

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Магістерська дисертація
на тему:
« Обробка тонкостінних деталей на верстатах з ЧПК»

Виконав Ю.М. Смітюх
Керівник І.І. Ткач

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Реферат

У дисертації розглянуто питання підвищення та контролю точності, підвищення продуктивності токарної обробки деталей типу тонкі кільця на основі досліджень навантажень на деталь в системі токарний патрон-деталь, аналізу впливу на процес оброблення сил різання та сил затиску, а також збурених ними деформацій обробленої деталі. Дослідження виконані на основі уже існуючих методів із використанням сучасного програмного CAD/CAE забезпечення та нових підходів. Практична частина експерименту була проведена на токарному верстаті для різних типорозмірів деталі та для різних умов оброблення.

Метою роботи є підвищення продуктивності оброблення тонкостінних кілець за умов малосерійного або одиничного виробництва на основі уже існуючих старих та нових способів оброблення, вибір оптимального.

Предметом дослідження є характеристики, деформації та сили, які відбуваються у процесі оброблення тонкостінних кілець при обробці у токарному патроні.

Головним об'єктом дослідження є частина системи токарного верстату патрон-деталь, що включає токарний патрон та оброблювану деталь, яка в процесі обробки змінює свої геометричні та інерційні характеристики.

Реферат

В диссертации рассмотрены вопросы повышения и контроля точности, повышение производительности токарной обработки деталей типа тонкие кольца на основе исследований нагрузок на деталь в системе токарный патрон-деталь, анализа влияния на процесс обработки сил резания и сил зажима, а также сподвигнутыми ими деформаций обработанной детали. Исследования выполнены на основе уже существующих методов с использованием современного программного CAD / CAE обеспечения и новых подходов. Практическая часть эксперимента была проведена на токарном станке для различных типоразмеров детали и для различных условий обработки.

Целью работы является повышение производительности обработки тонкостенных колец в условиях мелкосерийного или единичного производства на основе уже существующих старых и новых способов обработки, выбор оптимального.

Предметом исследования являются характеристики, деформации и силы, которые происходят в процессе обработки тонкостенных колец при обработке в токарном патроне.

Главным объектом исследования является часть системы токарного станка патрон деталь, включая токарный патрон и обрабатываемую деталь, которая в процессе обработки изменяет свои геометрические и инерционные характеристики.

Abstract

The dissertation deals with questions of improvement and control of accuracy, increase of productivity of turning of details of type of thin rings on the basis of researches of loadings on a workpiece in the system of turning cartridge-workpiece, analysis of influence on the process of processing of cutting forces and clamping forces, as well as perturbed deformations of the workpiece. The studies were performed on the basis of existing methods using modern CAD / CAE software and new approaches. The practical part of the experiment was performed on a lathe for different workpiece sizes and different machining conditions.

The purpose of the work is to improve the processing efficiency of thin-walled rings in the conditions of small-scale or single production on the basis of existing old and new methods of processing, choosing the optimal one.

The subject of the study is the characteristics, deformations and forces that occur in the process of machining thin-walled rings when machining in a lathe.

The main object of the study is a part of the cartridge-part lathe system, which includes a turning cartridge and a workpiece that changes its geometric and inertial characteristics during processing.

Зміст

Перелік умовних позначень, символів.....	8
Вступ.....	9
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ЛІТЕРАТУРИ.....	11
1.1 Питання про деформації тонкостінних деталей при обробці на верстатах токарної групи.....	11
1.2 Контактна механіка, в процесі обробки тонкого кільця.....	17
1.3 Забезпечення заданих вимог точності при обробці тонкостінних деталей літальних апаратів.....	24
1.4 Оснастка для обробки деталей невисокої жорсткості.....	30
1.4.1 Електромагнітні патрони.....	33
1.4.2 Технологічне армування виробів.....	35
1.5 Автоматизація вибору раціональних режимів токарної обробки тонкостінних деталей. Про «м'які» режими різання.....	38
1.6 Типова оснастка для обробки тонкостінних кілець.....	44
1.6.1 Розрізні втулки.....	44
1.6.2 Швидкозмінні універсальні кулачки для токарних патронів.....	46
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ФОРМУВАННЯ ДАНИХ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ ТА ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИН ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	48
3. ПРОВЕДЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИНИ ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	55
3.1 Моделювання процесу затиску деталі у віртуальному середовищі (CAE моделювання).....	55
3.2 Практична частин експерименту на токарному верстаті.....	69
4. Стартап.....	87
4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології).....	87
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту (табл. 13.).....	88
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	88
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	93

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	94
4.6. Висновки.....	95
5. ВИСНОВКИ.....	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	99
Додатки.....	102

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ

ЗП — затискний патрон;

ЧПК — числове програмне керування;

САЕ — (англ. Computer-aided engineering) — загальна назва програм або програмних пакетів, призначених для інженерних розрахунків, аналізу і симуляції фізичних процесів;

ВСТУП

Україна поступово прямує до свого промислового розквіту. Коли країни сусіди знаходяться в своїх пікових кондиціях, і в найближчий час почнуть здавати свої позиції промислових країн, Україна тільки починає своє тріумфальне сходження. В найближчий час іноземні інвестори в великому об'ємі почнуть вкладати в Україну свої капітали, що приведе до масового приросту робочих місць, середньої заробітної плати і економіки в цілому.

В умовах такого розвитку зросте приріст на хороших спеціалістів, які зможуть вирішити кожен поставлену перед ними задачу. За такого розвитку просто необхідно змінювати і розвивати типові і вже застарілі проблемні технології.

Наприклад на сьогоднішній день і досі є актуальною проблема обробки тонкостінних кілець. Деталі такого типу є дуже популярними, а в умовах промислового розвитку потреба в них виросте іще більше. Вони зустрічаються в конструкціях коробок передач, двигунах, колісних передачах, шківках тощо. Кільця поширені в автомобільному, літакобудівному, приладобудівному, аграрному та ін. секторах. Точна обробка тонких кілець має ключове значення для виконання багатьох механічних компонентів, таких як підшипники, кільця, турбіни тощо. Деталі типу тонкостінне кільце виробляються із всього спектру матеріалів, таких як сталі, чавуни, пластмаси, жароміцні сталі і тп. і конструкційно бувають дуже різними, що робить проблему доволі обширною.

Основними вимогами, які виставляються до готового виробу є допуск оброблюваного розміру та допуск круглості. А основною проблемою, відповідно, мінімізація впливу зусиль затиску на дуже гнучку заготовку. Більше того, іще на стадії підготівельних операцій кільця починають накопичувати помилки, які зі збільшенням кількості операцій збільшуються відповідно. Ці помилки виникають, як правило, під час термічної обробки та/або пластичної деформації на попередніх фазах виробництва тощо. Але, все ж, основним джерелом помилок є закріплення кілець в процесі токарної обробки. Сили затиску кулачків викликають кільцеві деформації дуже гнучкого кільця, що

створює помилки округлості виробу. Чим менша сила затиску, тим кращих допусків буде досягнуто, але недоліком зменшення сили тертя є збільшення ризику просковзування деталі в кулачках. Тому досягнення мінімальної, але безпечної сили затискання є ключовим фактором в управлінні процесом різання.

Аналогічним альтернативним варіантом отримання деформації виробу є обробка деталі при типових (рекомендованих) режимах різання, що у випадку тонкостінних деталей, так само, як і зажим, може призвести до відхилення деталі від допуску круглості і тп.

Для середньо- та багатосерійного виробництва існує сенс розробити унікальну оснастку, за допомогою якої, можна умовно збільшити жорсткість середовища, що дозволить досягти потрібної точності не змінюючи кардинально умов оброблення. Та для дрібносерійного або і разового виробництва розроблення такої оснастки призведе до збільшення затрат часу і собівартості готового виробу, що може бути недопустимим.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Питання про деформації тонкостінних деталей при обробці на верстатах токарної групи

Виготовлення тонкостінних деталей тягне за собою певну низку проблем, основною з яких є механічні деформації виробу за рахунок сили різання та сили зажиму деталі в токарному патроні. Зазвичай для великих партій таких деталей розробляється спеціальна оснастка або закуповується спеціальне обладнання, але в умовах середньосерійного виробництва таке рішення може бути недоцільним. Спеціальна оснастка призводить до колосального збільшення собівартості виробу, тому потрібне альтернативне рішення даного питання, яке не потребуватиме значних додаткових фінансових затрат.

Для того, щоб пропонувати якесь рішення потрібно спочатку проаналізувати механіку деформацію, та розглянути «масштаби трагедії» в цілому. Авторами статті «До питання про деформації тонкостінних деталей при обробці на верстатах токарної групи» Арбузовим Є.В., Жаргаловою А.Д., Лазаренком Г.П. та Семисаловим В.И., було розглянуто деформації тонкостінних труб та дисків в умовах токарної обробки.

Метод дослідження - числове моделювання деформації тонкостінних деталей під дією сил різання і сил закріплення. Причому очікуваними результатами було виявлення загального характеру і масштабів деформації деталей оброблених на токарних верстатах в типових 3х кулачкових патронах[15]. Посеред інших задач авторами було описано: типові схеми силового напруження тонкостінних деталей при їх обробці в верстатах токарної групи та стандартних пристроях; були змодельовані деформації оброблюваної деталі під впливом технологічних навантажень, визначення значень пружних деформацій оброблюваної поверхності деталей та проаналізовано вплив силових технологічних навантажень на пружні деформації.

І, в цілому, стаття направлена на принципове оцінювання можливості оброблення тонкостінної деталі в межах її допусків та інших характеристик

якості без використання додаткової оснастки зпроектованої для цих цілей, а лише за допомогою змін в режимах різання.

В якості об'єктів дослідження було обрано класичні тонкостінні деталі типу «труба»(Т) та «Диск»(Д) зображені на Рис. 1., які було представлено дев'ятьма деталями з різними типорозмірами (Т1.1-Т3.3, Д1.1-Д3.3), описаними в Табл. 1., кожна[15].

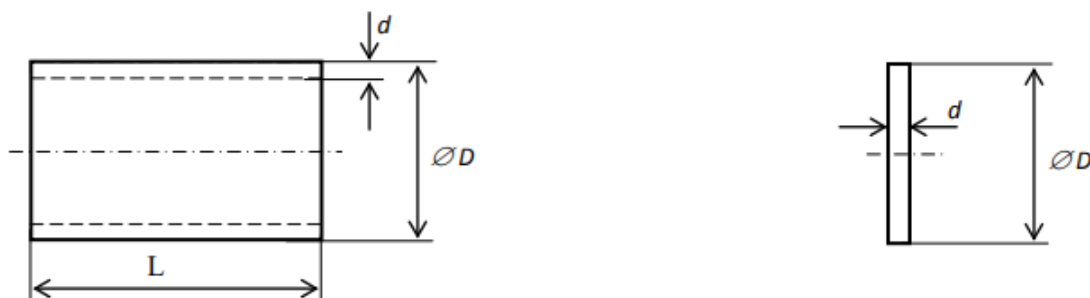


Рис. 1. Ескізи деталей типу «труба» та типу «диск»

В табл. 1. Представлені обрані для експериментів типорозміри деталей

Типорозміри деталей типу Т та Д	D, мм	L, мм	d, мм
Т1.1 / Д1.1	60	50	4
Т1.2 / Д1.2			5
Т1.3 / Д1.3			6
Т2.1 / Д2.1	125	100	8
Т2.2 / Д2.2			10
Т2.3 / Д2.3			12
Т3.1 / Д3.1	250	200	15
Т3.2 / Д3.2			20
Т3.3 / Д3.3			25

В якості матеріалу виробів Т та Д було обрано сталь 45 [15].

Щодо процесу обробки, то деталі піддавались повздовжньому (деталі класу Т) і поперечному (деталі класу Д) точінню і зажиму в стандартний три кулачковий патрон.

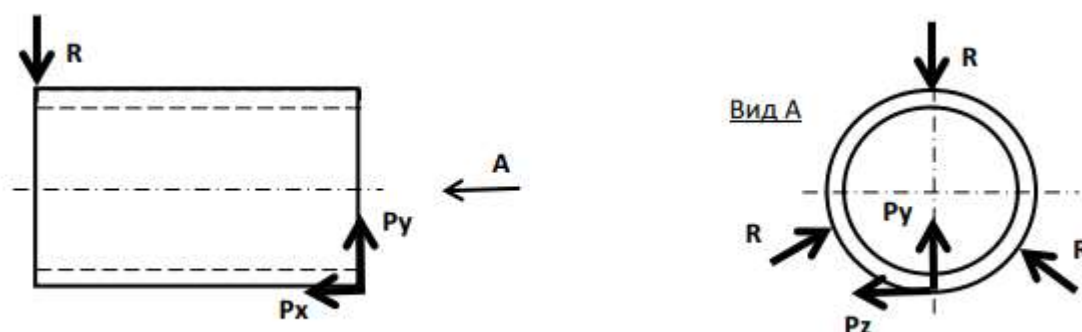


Рис. 2. Ескіз силового навантаження на деталь типу Т

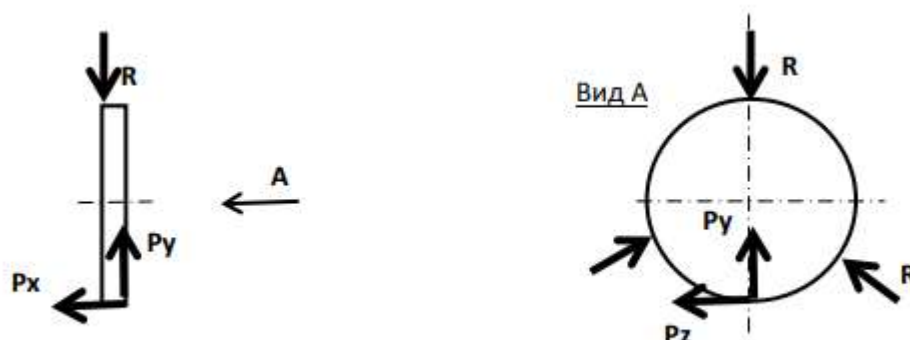


Рис. 3. Схема силового навантаження на деталь типу Д

Для кожного типорозміру деталі була змодельована обробка та за [19, 20] було обрано режими різання, відповідні трьом стадіям формоутворення чорнова обробка (R_a 12,5 мкм; IT10; режим обробки - $t = 1,25$ мм, $S = 0,9$ мм / об); чистова обробка (R_a 6,3 мкм; IT8; режим обробки - $t = 1,0$ мм, $S = 0,35$ мм / об); тонка обробка (R_a 1,25 мкм; IT6; режим обробки - $t = 0,85$ мм, $S = 0,1$ мм / об)[15].

Значення складових сил різання P_x , P_y , P_z визначались традиційно виходячи з технологічних параметрів різання по відомим аналітичним залежностям [18,19,20]. Значення сил закріплення R деталі в кулачках патрона визначалися з умов «непросковзування» деталі в кулачках за рахунок протидії сил тертя в точках контакту пар «кулачок-деталь» Табл. 2. [15]

Табл. 2. Сили різання при обробці деталей класу Т та Д

Типорозміри деталей типу Т та Д	Чорнова обробка Рх, Ру, Рz, R; Н	Чистова обробка Рх, Ру, Рz, R; Н	Тонка обробка Рх, Ру, Рz, R; Н
T1.1, T1.2, T1.3 Д1.1, Д1.2, Д1.3	770, 990, 2200, 1400	350, 450, 1000, 650	210, 270, 600, 380
T2.1, T2.2, T2.3 Д2.1, Д2.2, Д2.3	1750, 2905, 5000, 3100	665, 855, 1900, 1250	315, 405, 900, 500
T3.1, T3.2, T3.3 Д3.1, Д3.2, Д3.3	2905, 3735, 8300, 5100	875, 1125, 2500, 1550	420, 540, 1200, 750

Наступним кроком було моделювання всіх заданих даних в системі, яка здатна проаналізувати прогнозовані пружні деформації з урахуванням всіх допусків та обмежень. Моделювання проводили в два етапи, де першим стало моделювання деформації деталі від сил закріплення, а другим сумарний вплив сил закріплення та сил різання на деталь.

Результатами стали такі отримані данні:

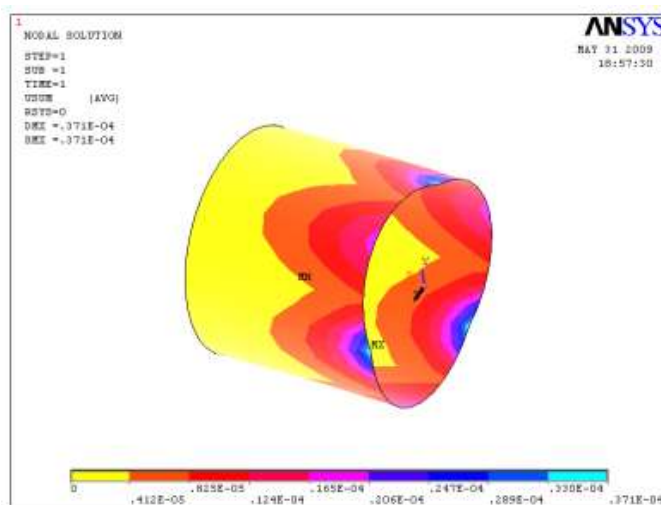


Рис. 4. Розподіл пружних деформацій деталі T1.1 під впливом сил затиску

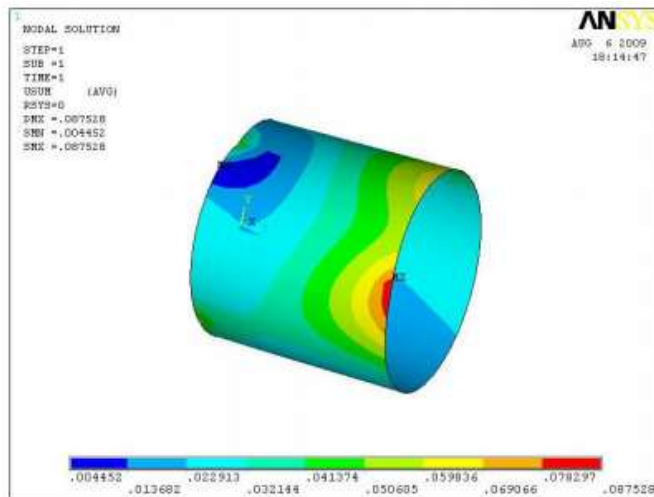


Рис. 5. Розподіл пружних деформацій деталі Т1.1 під впливом сумарних сил затиску та різання

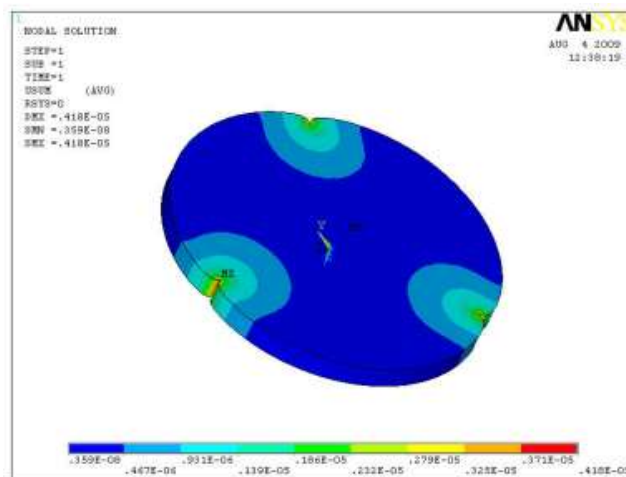


Рис. 6. Розподіл пружних деформацій деталі Д1.1 під впливом сил затиску

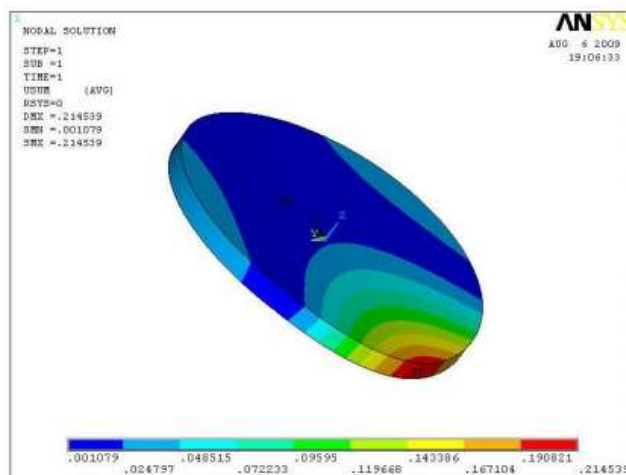


Рис. 7. Розподіл пружних деформацій деталі Д1.1 під впливом сумарних сил затиску та різання

Результуючі данні по моделюванню наведені в Табл. 3. для деталі Т та Табл. 4. для деталі Д, де значення в дужках допуск за відповідним квалітетом точності до заданого типорозміру деталі.

Табл. 3. Граничні значення деформації деталі отримані в процесі моделювання для деталі Т.

Типорозмір деталі	Чорнова обр.	Чистова обр.	Тонка обр.
T1.1	87,528 (120)	39,785 (46)	23,871 (19)
T1.2	54,815 (120)	24,916 (46)	14,950 (19)
T1.3	40,233 (120)	18,288 (46)	10,973 (19)
T2.1	104,034 (160)	39,533 (63)	18,726 (25)
T2.2	63,453 (160)	24,112 (63)	11,422 (25)
T2.3	45,454 (160)	17,272 (63)	8,182 (25)
T3.1	101,098 (185)	30,451 (72)	14,617 (29)
T3.2	52,670 (185)	15,864 (72)	7,615 (29)
T3.3	35,339 (185)	10,644 (72)	5,109 (29)

Табл. 4. Граничні значення деформації деталі отримані в процесі моделювання для деталі Д.

Типорозмір деталі	Чорнова обр.	Чистова обр.	Тонка обр.
D1.1	212,230 (120)	96,468 (46)	57,881 (19)
D1.2	114,544 (120)	52,065 (46)	31,239 (19)
D1.3	70,224 (120)	31,920 (46)	19,152 (19)
D2.1	259,599 (160)	98,648 (63)	46,728 (25)
D2.2	139,701 (160)	53,086 (63)	25,146 (25)
D2.3	85,358 (160)	32,436 (63)	15,364 (25)
D3.1	258,423 (185)	77,838 (72)	37,362 (29)
D3.2	115,952 (185)	34,925 (72)	16,764 (29)
D3.3	63,585 (185)	19,152 (72)	9,193 (29)

У відповідності з отриманими даними було зроблено висновки про те, що при використанні стандартних режимів різання та стандартної оснастки (трьох кулачкового патрону) деформації змінюються в широкому діапазоні і можуть трьократно перевищувати поле допуску на виконання розміру деталі.

Отриманні данні дозволяють зробити висновки щодо контролю деформації за умови використання «м'яких» режимів різання у процесі оброблення.

Отримані результати підтверджують можливість прогнозування топології технологічних деформацій тонкостінних деталей при їх механічній обробці.

1.2 Контактна механіка, в процесі обробки тонкого кільця

1. Основною проблемою оброблення тонкостінних кілець є пружні деформації деталі, які призводять до зміни геометрії деталі та нерівномірності товщини стінок після закінчення обробки. Ці деформації утворюються за рахунок точкової сили затиску деталі кулачками токарного патрону. Чим менша сила затиску, тим менше впливу на геометрію деталі ми провокуємо, та недоліком є зменшення сили тертя і, отже, збільшення ризику просковзування. Однак зменшення сили затиску нижче мінімальної межі, що може призвести до серйозних аварій [21], якщо деталь вирве з патрону. Тому досягнення мінімальної, але безпечної сили затиску є ключовим фактором управління процесом. Окрім цього слід враховувати швидкість шпинделя, оскільки із її збільшенням зростають відцентрові сили, а утворена динамічна реакція системи впливає на процес різання [22, 23]. Тому сила затиску повинна долати такі фактори різання, як відцентрові сили, моменти згинання [24], вібрації [25] тощо.

Завдяки розташуванню кулачків і концентричному механізму трикулачковий патрон є найпоширенішим видом оснастки для виготовлення токарних деталей. Та для тонкостінних деталей використовують деякі спеціалізовані пристосування, наприклад шестигранні патрони (лідером в вивчені даного питання та розробці обладнання є фірма Schunk) або сегментовані кулачки, але їх використання викликає деякі проблеми, як то статичність та відсутність гнучкості у кулачків, що змусить змінювати кулачки для кожної деталі, та висока ціна для патронів, яка для малої партії є нерентабельною тратою тощо.

У літературі існують методи для розрахунку напружень та деформацій у тонкостінних кільцях, оброблюваних в токарних патронах. Найпоширеніший - це метод кінцевих елементів (МКЕ) [27], але він має високі обчислювальні витрати, оскільки для досягнення достатньої точності потрібні точні данні. Аналогом є аналітичний метод розроблений Маллуком та Мелкоте [28] за допомогою якого виводяться вирази внутрішнього моменту та деформацій кільця. Цей метод перевіряли експериментально та методом кінцевих елементів (МКЕ).

Оскільки аналітичний метод Маллука та Мелкоте швидший, ніж метод (МКЕ), багато робіт базуються на цьому. Наприклад, Карнаді та ін. [29] використовував його в оптимізації операцій обробки. Сьолтер та ін. [30, 31], використовував його в моделі для прогнозування помилок, використовуючи різні стратегії кріплення. Штрюбенер та ін. [32] використовував його як аналітичний інструмент для вивчення різних стратегій, таких як ультразвукове зондування та використання Fast Tool Servo для компенсації помилок у режимі реального часу. Солейман і Мехр [33] також використовують цей підхід і т. д. [26].

Щоб уникнути вищезазначених проблем, чисельно-аналітичний розрахунок для отримання контактних напружень у зоні контакту кулачки-деталь, описаної в [34], було вдосконалено, до розрахунків врахували розрахунок жорсткості кулачків, а також було враховано реакції в кулачках на силу різання. Запропоновано простий та економічний метод інтеграції, у якому 6 невідомих у 3х виразах. Недолік спрощеного обчислення Мелкоте [28] пов'язаний з припущенням реакції кулачків у точці, що спричиняє розрахунок невірних екстремумів напружень, в роботі враховані напруження на область, щоб отримати реальну епюру напружень. Більше того, у цій роботі локальні навантаження оцінюються за допомогою методів контактної механіки, що застосовує Герц для малої зони контакту, і методу, розробленого Карреро-Бланко [35] для великої, де ширина контакту залежить від величини радіуса, наприклад у сегментованих кулачках. Використання теорії контактної механіки

обмежує значення моменту і дозволяє врахувати глобальне навантаження, обчислене теоремою Кастільяно [34] та локальними напруженнями, обчисленими контактною механікою [35].

2. Модель сил та моментів прикладених до кільця

На рис. 6. показаний ескіз прикладених навантажень, який використовує теорему Кастільяно для обчислення моментів згину. Сила P_i враховується тільки при вивченні окремого сектору кільця. Умови рівноваги, симетрія ескізу, рівномірність кільця та відсутність тертя призводить до того, що сума сил P_i формує результуючу силу затиску кулачків P .

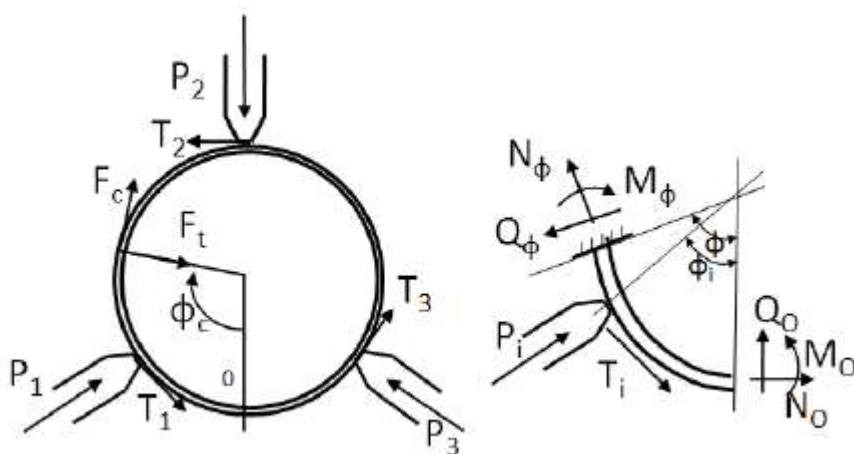


Рис. 6. Ескіз прикладених до кільця та його сектору сил та моментів

Рівняння рівноваги (1) за Кастільяно сектору кільця, зображеного на Рис. 6. будуть мати такий вигляд [26]:

$$\begin{aligned}
 M(\phi) &= M_0 + rQ_0 \sin(\phi) + N_0 r(1 - \cos(\phi)) - P_i r \sin(\phi - \phi_i) + \\
 &\quad + T_i r(1 - \cos(\phi - \phi_i)) \\
 Q(\phi) &= N_0 \sin(\phi) + Q_0 \cos(\phi) + P_i \cos(\phi - \phi_1) + \\
 &\quad + T_i \sin(\phi - \phi_1)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$N(\phi) = -Q_0 \sin(\phi) + N_0 \cos(\phi) - P_i \sin(\phi + \phi_1) + T_i \cos(\phi - \phi_i)$$

Кільце вважається твердим тілом, що має три рухи два поступальних δ_x , δ_y та один обертальний δ_θ в центрі кільця. Кулачки мають нормальну та тангенціальну жорсткість k_n та k_t , які однакові для всіх трьох секторів. Вводячи силу різання, реакція в кулачках представляє 6 невідомих для 3 рівнянь статичної рівноваги[26].

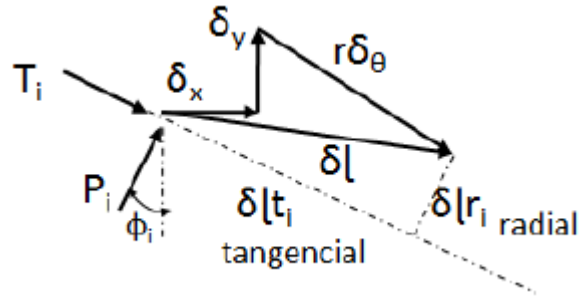


Рис. 7. Схема сил в кулачку

З рис. 7. виходять такі співвідношення (2) між повноцінними переміщеннями (δx , δy , $\delta \theta$) та локальними переміщеннями (δr , δt) у кожному кулачку (i)[26]:

$$\begin{aligned}\delta l &= \delta x + \delta y + r\delta\theta = \delta l_t + \delta l_r \\ \delta l_t &= r\delta\theta + \delta x \cos\phi_i - \delta y \sin\phi_i \\ \delta l_r &= \delta x \sin\phi_i + \delta y \cos\phi_i\end{aligned}\quad (2)$$

Припустимо, жорсткість кулачків нормальна k_n і тангенціальна k_t , тоді реакції кулачка такі[26]:

$$\begin{aligned}P_i &= k_n \cdot \delta l_{ri} \\ T_i &= k_t \cdot \delta l_{ti}\end{aligned}\quad (3)$$

Враховуючи момент рівноваги та співвідношення сил, нехтуючи різницею радіусу прикладених сил до зовнішній поверхні T_i та ріжучої сили F_c отримаємо[26]:

$$\Sigma T_i + F_c = 0 \quad (4)$$

$$0 = \Sigma(P_i \cos\phi_i - T_i \sin\phi_i) + F_c \cos\phi_c + F_t \sin\phi_c \quad (5)$$

$$0 = \Sigma(P_i \sin\phi_i + T_i \cos\phi_i) - F_c \cos\phi_c + F_t \sin\phi_c$$

Далі, використовуємо систему координат Рис.1. в рівнянні (2)[26]:

Вираз 1:

$$\delta l_r = \delta y$$

$$\delta l_r = r\delta\theta + \delta x$$

Вираз 2:

$$\delta l_r = 0.5\sqrt{3}\delta x - 0.5\delta y \quad (6)$$

$$\delta l_t = r\delta\theta - 0.5\delta_x - 0.5\sqrt{3}\delta_y$$

Вираз 3:

$$\delta l_r = -0.5\sqrt{3}\delta_x - 0.5\delta_y$$

$$\delta l_t = r\delta\theta - 0.5\delta_x + 0.5\sqrt{3}\delta_y$$

Підставивши (6) в (3) отримаємо P_i та T_i на всій ділянці кулачка[26]:

$$\begin{aligned} k_n \cdot \frac{3}{2}\delta_x + k_t \cdot \delta_x(1 + 0.5) &= F_c \cos\phi_c - F_t \sin\phi_c \\ k_n(\delta_y - 0.5\delta_y) + k_t(3 \cdot 0.5\delta_y) + F_t \cos\phi_c + F_c \sin\phi_c &= 0 \\ k_t(3r\delta\theta) - F_c &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Це система рівнянь, рішення якої[26]:

$$\begin{aligned} \delta_x &= \frac{F_c \cos\phi_c - F_t \sin\phi_c}{1.5(k_n + k_t)} \\ \delta_y &= \frac{-F_c \cos\phi_c - F_c \sin\phi_c}{1.5(k_n + k_t)} \\ \delta_\theta &= \frac{F_t}{3rk_t} \end{aligned} \quad (8)$$

Визначивши P_i та T_i перевіряємо правильність підставляючи (8) в (3), далі переходимо до рівняння (1) щоб знайти момент згину та побудувати діаграми розрізу на всіх ділянках кільця. Для того, щоб отримати M_0 , Q_0 і N_0 , їх обчислюють за трьома умовами, заданими послідовно в точці 0 на Рис.6. тобто для $\phi = 2\pi$, тоді $M_\phi = M_0$, $Q_\phi = Q_0$, $N_\phi = N_0$, і $\delta_r = 0$, $\delta_t = 0$ і $\delta_\theta = 0$. Для знаходження δ_r , δ_t та δ_θ використовується теорема Кастільяно. Для отримання значень у точках при переходах, тобто реакції в кулачках, контактна механіка враховується в системі кулачок-деталь. M_0 , Q_0 і N_0 обчислюються таким чином, що послідовність у $\delta_r(\phi)$, $\delta_t(\phi)$ і $\delta_\theta(\phi)$ задається в точці 0, коли $\theta = 0$ і $\theta = 2\pi$, у спосіб показаний у [34]. Після отримання M_0 , Q_0 та N_0 отримують глобальні напруження для критичних частин.

3. При вивченні контактної механіки Кастільяно враховував контакт деталь-кулачок в точці, що утворювало неправдивий екстремум і не вирішувало проблему (Рис. 8.). Насправді ж описувати контакт доцільно набором точок в кожній з яких напруження відмінні (Рис. 9.). Для розрахунку напружень в

кулачках, спочатку розраховують локальні напруження, а потім методом суперпозиції підставляють все в глобальне дослідження. Для невеликої зони контакту використовується класична еластична контактна модель Герца. Для тих, у яких половина ширини контакту знаходиться в порядку величини радіуса, наприклад, у сегментованих кулачках, застосовуватиметься методика, розроблена Карреро-Бланко в [35] (див. Рис.10)[26].

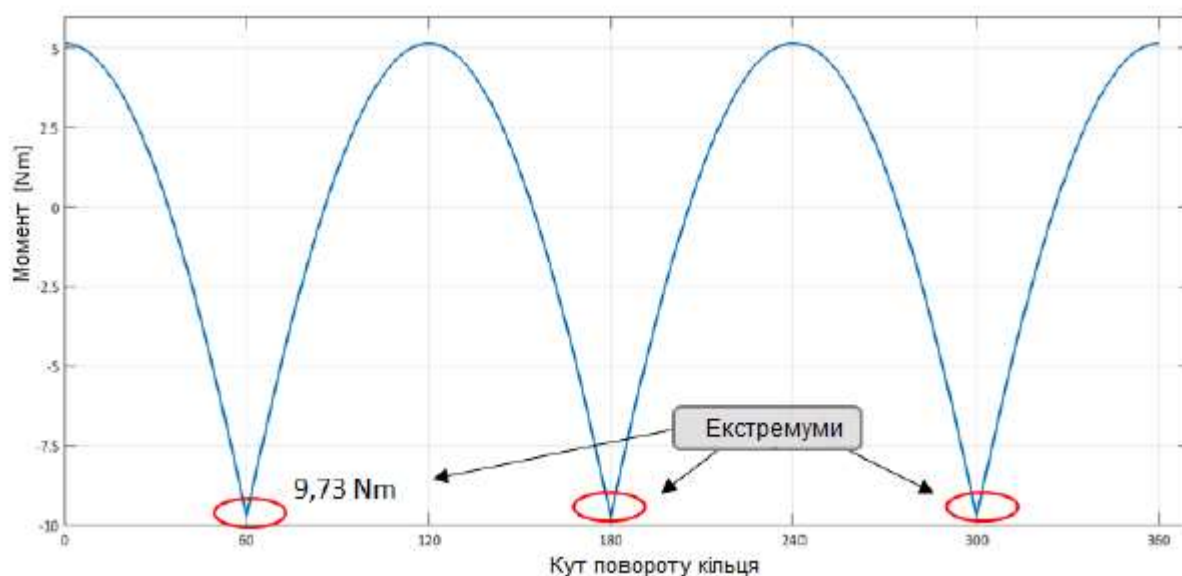


Рис. 8. Момент згину кільця із силою затиску 930 Н без урахування контактної механіки

Модель Герца для зовнішнього контакту:

$$a = \sqrt{\frac{4 \cdot R_{eq} \cdot P}{\pi \cdot E}} \quad (9)$$

$$P_{(Hertz)} = \frac{a \cdot E}{2 \cdot R_{eq} (1 - \nu^2)} \quad (10)$$

Для внутрішнього:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_{jaw}} + \frac{1}{R_{ring}}} \quad (11)$$

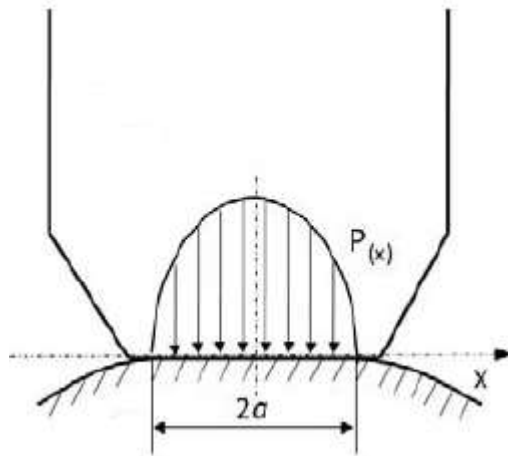


Рис. 9. Розподіл тиску в контактній ширині кулачка



Рис. 10. а) Сегментний патрон токарного верстата. Велика зона контакту. б) Звичайний токарний патрон. Невелика зона контакту.

Модель Карреро-Бланко для великої зони контакту:

$$p(x) = \frac{E \cdot a \cdot \left(\frac{R_{ring}}{R_{jaw}} - 1\right)}{2\pi(1-\gamma^2)\sqrt{a^2-x^2}} \left[\int_{-1}^1 \frac{\tan\left(\frac{a \cdot t}{R_{ring}}\right) \sqrt{1-t^2}}{\cos\left(\frac{a \cdot t}{R_{ring}}\right) \cdot \left(t \frac{x}{a}\right)} \delta t - \int_{-1}^1 \frac{\tan\left(\frac{a \cdot t}{R_{ring}}\right) \sqrt{1-t^2}}{\cos\left(\frac{a \cdot t}{R_{ring}}\right) \cdot (t-1)} \delta t \right] \quad (12)$$

Дана формула дозволяє розрахувати розподіл тиску в зоні контакту, що є половиною ширини. З цього Естремс розробив свій числовий метод визначення розмірної карти поверхонь, що контактують (кулачок-кільце) [36].

4. Вплив коефіцієнту тертя на контактні напруження

Для тих випадків, коли площа контакту невелика, а напруження великі, знання коефіцієнту тертя μ дозволяє отримати зону проскозування Каттанео

[37], а отже, визначити карту підповерхневих зусиль [36] для порівняння з картою глобальних напружень. На Рис. 11., нормальний тиск $p(r)$ і тангенціальний тиск $q(r)$ внаслідок тертя представлені циліндричною функцією зліва, головні зусилля зсуву зображені праворуч. Як це спостерігається на графіку, значення та глибина критичної точки є дуже подібними до заданих, у цьому випадку, до теорії Герца[26].

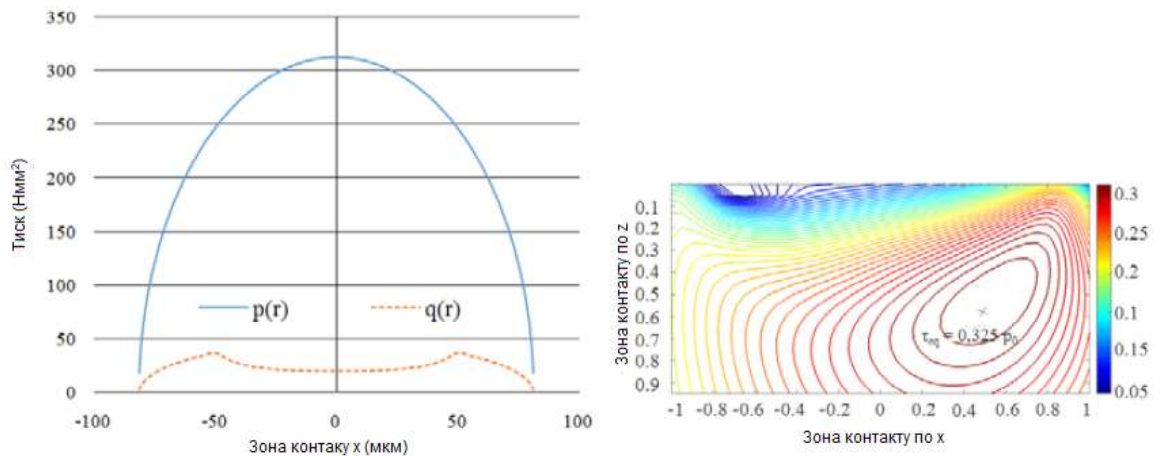


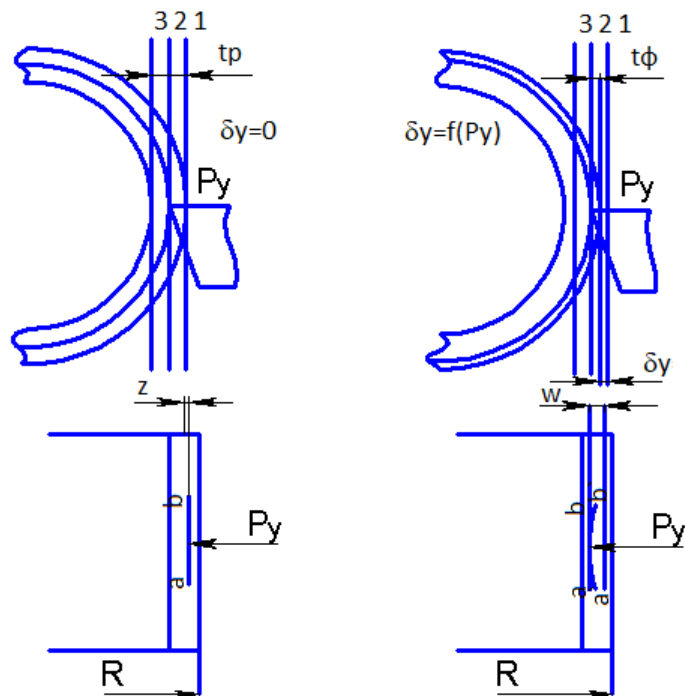
Рис. 11. Нормальний та тангенціальний розподіл тиску та карта напружень у зоні контакту кулачок-деталь з $T = 40$ N, $P = 400$ N, $\mu = 0,15$.
Алюмінієве кільце діаметром 80 мм та шириною 10 мм па плоскі кулачки.

У статті за авторством М. Естремса, Дж. Кореро-Бланко, В. Є. Кумбікуса, О. де Франциско Х. Т. Санчеза та було вказано на помилки при попередніх розрахунках контактних зусиль у системі кулачок-деталь, та запропоновані методи вдосконалення розрахунків, для можливості досягнення кращих результатів в процесі обробки тонкостінних кілець. Важливим моментом стало наведення ілюстраційних матеріалів, а також введення різних розрахункових формул для різних типів зажиму кулачками токарного патрону.

1.3 Забезпечення заданих вимог точності при обробці тонкостінних деталей літальних апаратів

Розмірна обробка тонкостінних деталей на технологічних операціях точіння, шліфування та інших пов'язана з прогином оброблюваних поверхонь впливом сил різання і формуванням пов'язаних з цим похибок обробки

Задані вимоги точності обробки в зазначених умовах забезпечують шляхом багаторазового коригування керуючих програм верстатів, зниженням параметрів режиму різання, більш часті зміни ріжучих інструментів та інших рішень, пов'язаних зі зниженням продуктивності і з підвищенням собівартості обробки. Характерна схема деформації деталі під дією сил різання і формування похибок приведена на рис. 12 [39].



Для своєчасного врахування заданих вимоги точності важливо
 ечити прогнозування розглянутих відхилень на стадії технологічної
 овки виробництва. На рис 12 (Вид А і Б) наведені схеми переміщення
 тарного відрізка а – б утворюючого циліндричну оболонку, розташовану
 тані z від серединної поверхні.

З рис. 12 видно, що похибка розмірної обробки під дією сил різання визначиться з умови:

$$\Delta y = t_p - t_\phi, \quad (13)$$

де t_p та t_ϕ фактична і розрахункова глибина різання, а Δy значення пружного переміщення оброблюваного елемента під дією радіальної складової сили різання.

Пружне переміщення Δy сприяє формуванню похибки $\delta \Delta y$.

Оцінку похибок, пов'язаних з переміщенням оброблюваних поверхонь під дією сил різання, запропоновано виконати із застосуванням положень теорії пружності [38].

Розрахунок прогинів під дією радіальної складової сили отримані на основі розгляду кругової циліндричної оболонки.

З кругової циліндричної оболонки (рис. 13), навантаженої силою P_y двома осьовими і двома нормальними до осі X перетинами виділимо елемент площею $Rd\phi dx$. На цей елемент буде впливати система зусиль і зовнішніх навантажень T_m , T_ϕ , Q внутрішні сили, M_x , M_y - крутний момент, показані на рис. 13.

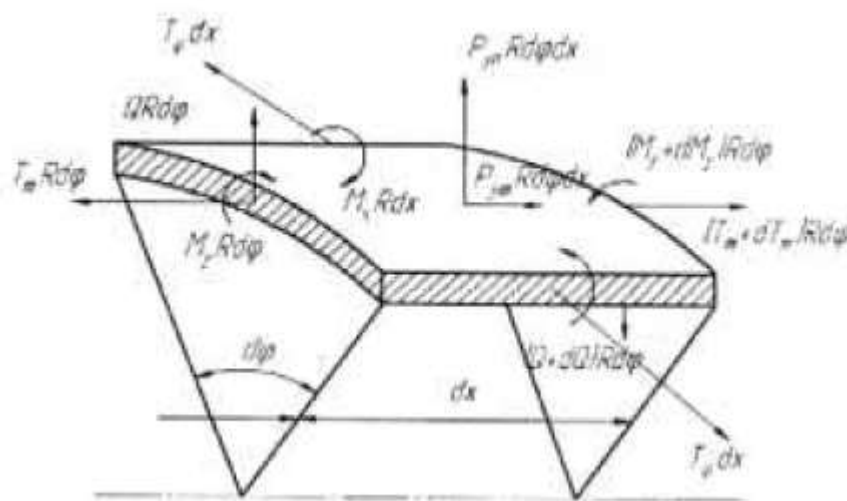


Рис.13. Кругова циліндрична оболонка навантажена силами та моментами

З шести рівнянь рівноваги три задовольняють рівність, а до нетривіальних результатів призведуть тільки такі умови [40]:

$$\Sigma_{\text{piv.}} X = 0; \Sigma_{\text{piv.}} R = 0; \Sigma_{\text{piv.}} Y = 0 \quad (14)$$

Звідки:

$$(T_m + dT_m) \times R d\phi - T_m R d\phi + P_y R d\phi dx = 0; \quad (15)$$

або

$$dT_m + dx = 0; \quad (16)$$

$$2T_\phi dx \times \sin \frac{d\phi}{2} - (Q + dQ) R d\phi - Q R d\phi - P_y R d\phi dx = 0,$$

В зв'язку з малими кутами $\sin \frac{d\phi}{2}$ заміняємо на $\frac{d\phi}{2}$, отримуємо:

$$\frac{dQ}{dx} + \frac{T_\phi}{R} = P_y$$

$$M_y R d\phi - (M_y + dM_y) \times R d\phi + (Q + dQ) R d\phi dx + P_y R d\phi dx \frac{dx}{2} = 0 \quad (17)$$

Розкрив дужки і відкинув мізерні величини отримаємо:

$$Q = \frac{dm_y}{dx} \quad (18)$$

Тоді шукана величина пружнього віджиму визначається з порівнянь довжин окружностей серединної поверхні до і після деформацій:

$$\Delta y_1 = \frac{2\pi(R'-z+w) - 2\pi(R'-z)}{2\pi(R'-z)} = \frac{w}{R'(1-\frac{z}{R})}, \quad (19)$$

$$v(l) = \frac{P_y l^3}{18EJ} \quad (20)$$

де $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ - циліндрична жорсткість;

$k = \sqrt{\frac{Eh}{4R^2D}}$ - коефіцієнт затухання переміщень;

E - модуль пружності;

ν - коефіцієнт Пуансона.

В таких умовах забезпечення точності обробки деталі суттєве значення має фактор безперервного зносу інструменту. При цьому повинні бути враховані характеристики розмірного зносу інструменту, які безпосередньо впливають на фактичну глибину різання:

$$t_\phi = t_p - h_r \quad (21)$$

де h_r – розмірний знос інструменту.

Окрім цього необхідно враховувати, що під час зносу інструменту по задній кромці відбувається збільшення сили різання. Так, при збільшенні такого зносу прохідного різця зміна сил різання може бути описана залежністю:

$$P_{y(зн.)} = P_{y(пер.)} \cdot K_{зн.} \quad (22)$$

де $P_{y(зн.)}$ та $P_{y(пер.)}$ – складові сили різання різця зі зносом h_3 та переточеного різця;

$K_{зн.}$ – коефіцієнт, враховуючий вплив зносу h_3 на значення сили різання; при $h_3 = 0,3 \dots 0,5$ мм при обробці деталі зі сталей сплавів ХН38ВТЮ, 15Х12В2МФ, ВТ9 $K_{зн.} = 1,8 \dots 3,2$.

Розмірний знос ріжучого інструменту сприяє формуванню похибки $r_{інстр.}$. При цьому сумарна похибка $\delta_\alpha = \delta_{\Delta y} + \delta_{інстр.}$

Окрім всього вище названого, необхідно відмітити, що на точність також впливають теплові деформації вузла деталь-інструмент, однак у проведеному експерименті їх доля складає 5-7% [39].

Отримані результати показали, що зниження жорсткості деталі по мірі обробки супроводжується збільшенням впливу, на точність обробки, сил різання за рахунок зносу інструменту.

На верстатах з ЧПК, при автоматичній обробці, формується похибка обробки за рахунок пружних деформацій оброблюваних елементів деталі. Завчасне знання таких похибок дозволить вносити корективи, що дозволить забезпечити задані вимоги до точності.

Такий підхід дозволив систематизувати весь накопичений експериментально досвід в методику управління процесу прогинами і відповідно похибками обробки Рис. 14. [39]

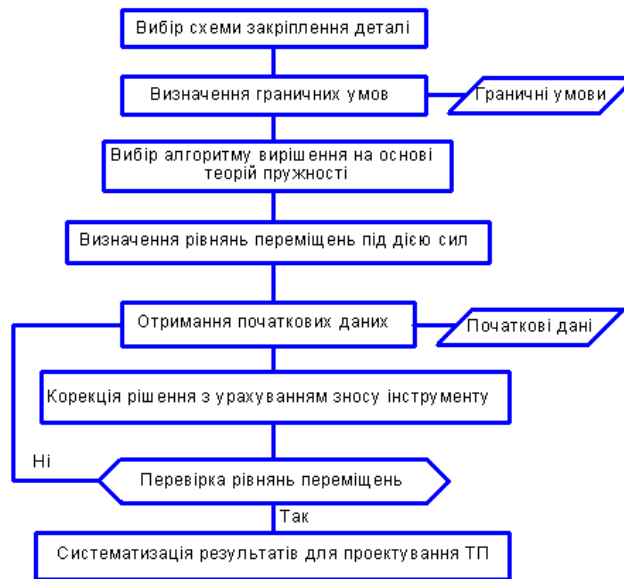


Рис. 14. – Схема автоматизованого управління похибками при токарній обробці



Рис. 15. Технологічні прийоми керування деформаціями при обробці нежорстких деталей на верстатах з ЧПК

Отримані та експериментально перевіренні данні та методика обробки дозволяють:

Використовувати оптимальні схеми зняття припуску і закріплення деталей;

Визначати необхідні корекції для обробки тонкостінних нежорстких деталей на верстатах з ЧПК.

Визначення оптимальних компоновок верстатів та оснастки для них Рис. 15.

1.4 Оснастка для обробки деталей невисокої жорсткості

Диспропорція в конструктивних параметрах деталей створила серйозні технологічні труднощі у виробництві. Вони викликані, насамперед, технологічною спадковістю матеріалу деталей, їх високою чутливістю до пружних деформацій, які часто перевищують задані допуски на геометричну форму та розміри деталей.

Аналіз виробничого досвіду авторами Л.С. Куклевим та М.М. Тазетдиновим показав, що традиційні способи виготовлення масивних деталей малоефективні для виробництва нежорстких, тому питання їх виготовлення на практиці вирішуються введенням додаткових операцій ручного доведення. Такий шлях істотно збільшує трудомісткість виготовлення виробу і не гарантує задану якість. Звідси абсолютно очевидна актуальність проблеми виробництва нежорстких деталей високої точності.

Основною причиною технологічних труднощів при обробці нежорстких деталей є порівняно високі пружні властивості матеріалів, які викликають пружні деформації на всіх стадіях обробки, складання і експлуатації деталей [2, 3]. Другою причиною є різна піддатливість елементів системи ВПІД [4, 5, 6].

Третя причина - це мала термостійкість деталей, при високошвидкісній обробці. І, нарешті, четверта причина полягає в тому, що висока чутливість нежорстких деталей до пружних переміщень і контактних деформацій служить джерелом вібрації системи ВПІД [7].

Негативна дія цих факторів при обробці тягне за собою порушення баз, погрішності форм і розмірів деталей, поверхневі дефекти, обмеження режимів різання, точносні можливості верстатів і стійкість інструменту. Тому назріла потреба в удосконаленні існуючих та розробці нових технологічних процесів виготовлення таких деталей.

Вирішенню цього завдання сприяють: відпрацювання на технологічність конструкції деталей з урахуванням заданих жорсткості і точності; вибір

заготовки, обладнання, послідовності і схем обробки деталей, що усувають пружну спадковість на всіх стадіях виробничого процесу; проектування швидкодіючих механізмів затиску, що дозволяють виконувати технологічний процес з дуже малим навантаженням деталей; створення установчо-затискних механізмів оснащення, здатних одночасно рівномірно навантажувати деталі і розсіювати теплові потоки [8, 9].

За геометричною формою, розмірами, значенням модуля пружності матеріалів і схемою навантаження розрізняють категорії масивних і нежорстких деталей. Масивними називають конструкції деталей, габаритні розміри яких дорівнюють або мало відрізняються один від одного; ідеальними - деталі симетричної форми, наприклад куб або куля. До нежорстких конструкцій відносять деталі з різними розмірами поперечних перерізів $A \times B$, довжин l , товщин стінок t , та висот H . До цієї групи входять деталі типу труби, стержні, пружини, гільзи, а також деталі типу кільця, в яких діаметр в рази перевищує висоту $D \gg H$.

Нежорсткість конструкції ряду деталей описують кількісним співвідношенням його основних розмірів. Прийнято тіла обертання з $l > 2D$ відносити до деталей типу вали, осі, стрижні, а $l \leq 2D$ - до втулок, дисків, кілець, шківів, катушок [1].

Що стосується класичних затискних механізмів, то типовою оснасткою для виготовлення осьових деталей є так звані механізми точкового контакту, до яких належать призматичні, кулачкові, цангові затискні механізми. В такому випадку зосереджені радіально спрямовані сили P пружно деформують деталь l і порушують її геометричну форму. Щоб уникнути цього такі механізми застосовуються обмежено. При цьому призначаються дуже малі значення режимів різання і використовуються УЗМ з великим числом кулачків або затискних пелюсток.

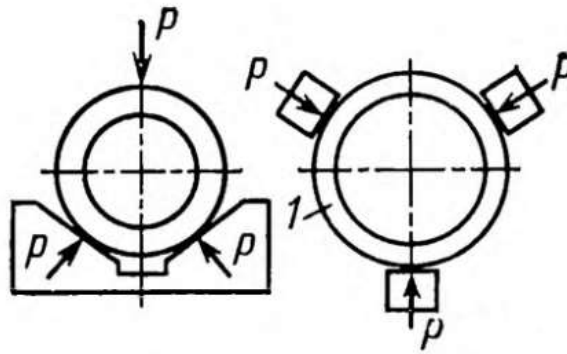


Рис. 16. Схеми нерухомих лінійних контактів

В ході аналізу результатів оброблення стає зрозуміло, що для нежорстких деталей типу кільця можна зробити такі висновки:

Для кріплення нежорстких деталей високої точності доцільно максимально-можливо збільшувати площу контакту оброблюваної деталі із затискним механізмом. Така оснастка одночасно буде забезпечувати закріплення, умовну жорсткість деталі та буде виконувати віброгасні функції.

Системи кріплення з точковим контактом доцільно використовувати лише в випадках, коли вимоги до точності дозволяють залишити деформації виробу. Рекомендовано використання при занижених режимах різання, що дозволить зменшити вимоги до сили затиску.

Для зменшення деформацій за рахунок теплового впливу необхідно використовувати затискні елементи з теплопровідних матеріалів, для зменшення загальної температури середовища.

При виборі затискних елементів необхідно рекомендовано конструктивно продумати мінімальну кількість установ, для зменшення загального часу оброблення деталі, оскільки така оснастка може збільшувати допоміжний час. Також необхідно розуміти, що збільшення площі контакту призводить, до зменшення відкритих ділянок, що може ускладнити процес обробки деталі.

Економічно доцільно розробляти максимально універсальну оснастку, оскільки її собівартість може значно збільшити вартість готового виробу.

Автор пропонує два варіанти вирішення задачі закріплення тонкостінних кілець:

1.4.1 Електромагнітні патрони

Використання електромагнітних патронів в процесі виробництва тонкостінних кілець дозволить виконувати обробку деталі з прикладенням сил закріплення в осьовому напрямку деталі або, в випадку іншої конфігурації, доповнюючи механічне зусилля затиску електромагнітним.

Підвищення міцності кріплення деталей, ступеня універсальності і уніфікації конструкцій, а також безпеки експлуатації - такі основні напрямки розробки та вдосконалення електромагнітних патронів.

Потреба виробництва в посиленні кріплення пояснюється тим, що, по-перше, зростає питома вага чистового і тонкого точіння при остаточній обробці деталей. По-друге, у виробках конструктивна міцність і зносостійкість деталей підвищується головним чином заміною низьковуглецевих марок сталей на леговані і інструментальні. При цьому навантаження різання зростають пропорційно твердості, а сила електромагнітного тяжіння зменшується, оскільки із зростанням твердості падає індукція матеріалу, тобто між механічною і магнітною характеристикою сталей існує зворотна залежність.

По-третє, прагнення до підвищення продуктивності праці збільшує момент різання M_p , який врівноважується моментом тертя $M_{тр}$, тобто $M_p \leq M_{тр}$, або $P_z R_p \leq R_{тр} f Q_a$ де P_z - тангенціальна сила різання, кгс; R_p , $R_{тр}$ - радіуси поверхні точіння і тертя, мм; f - коефіцієнт тертя ковзання; Q_a - сила електромагнітного тяжіння, кгс.

Залежно від ступеня завантаження верстатів застосовують такі конструкції патронів. У масовому і великосерійному виробництві при 75-95% -ньому завантаженні однією операцією - патрони з постійною магнітною системою, в серійному і дрібносерійному виробництві - патрони з перестановкою і регульованою системами.

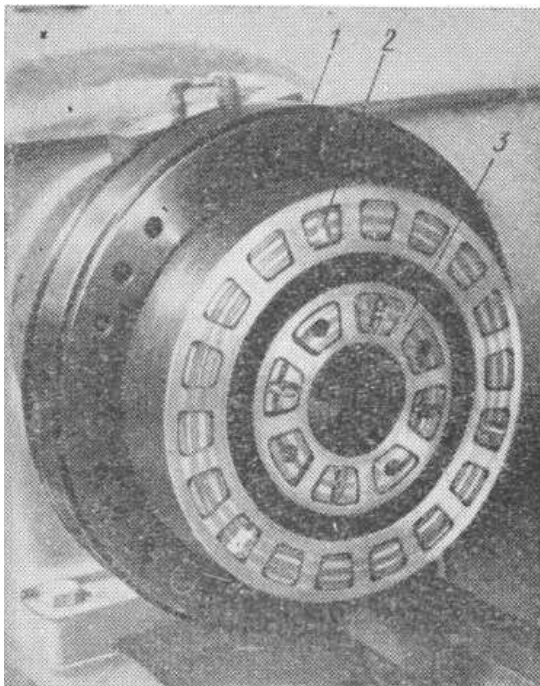


Рис. 18. Патрон з регульованою електромагнітною системою

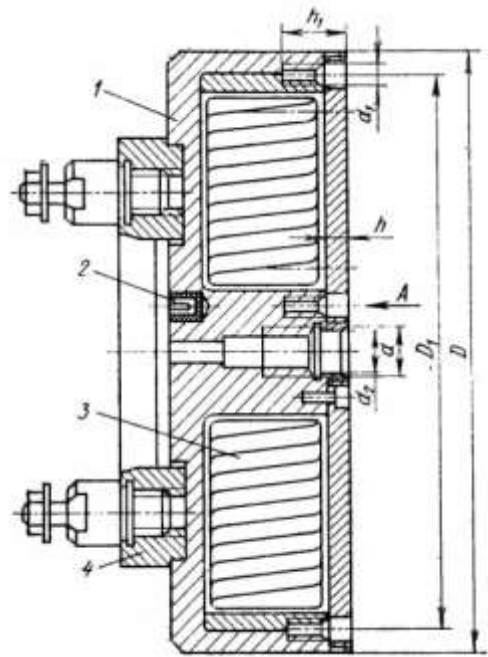
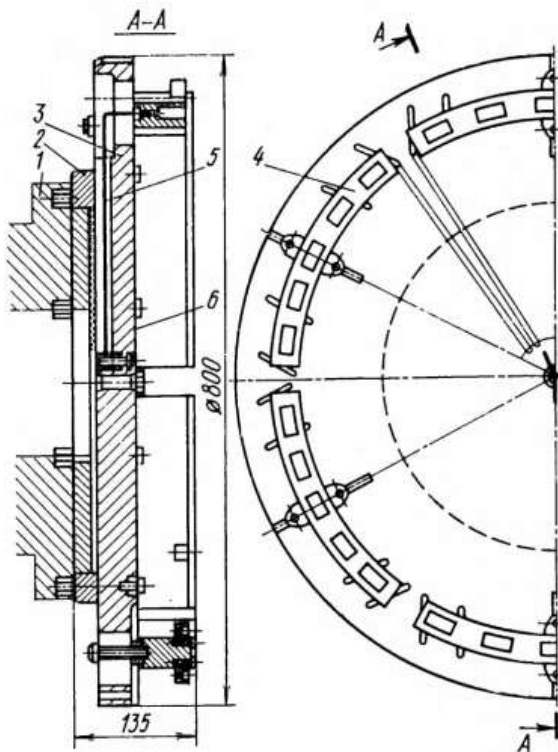


Рис. 17. Патрон з постійною електромагнітною системою

Патрон з постійною магнітною системою (рис. 17) складається з корпусу-магнітопроводу 1, котушок 5, одягнутих на полюси секторної форми, штепсельних гнізд 2 і приєднувальної планшайби 4. Для установки і кріплення змінних налагоджень в патроні зроблені посадочно-кріпильні елементи розмірами $d, d_2, h, d_1, h_1, D, D_1$ [1].

Патрон з переставною електромагнітною системою (рис. 18) містить корпус 1, постійно закріплений на верстаті, і серію швидко переналагоджуваних електромагнітних кілець-налагоджень 2 і 3. Найбільш ефективно їх використовувати для обробки з одної технологічної установи трьох операцій:

зовнішня проточка, розточування отвору і підрізування торця. У цьому випадку розміри електромагнітних кілець визначають наступним чином: $D_n = D_d(0,5 \div 1)$ і $d_n = d_d + (0,5 \div 1)$, де D_n , D_d , d_n , d_d - зовнішні і внутрішні діаметри кілець і деталі.[1]



Патрон з регульованою системою (рис. 19) призначений для кріплення нежорстких деталей з зовнішнім діаметром до 1000 мм. Корпус 3 патрона закріплюють планшайбою 2 на шпинделі 1 верстата. На корпусі розташовані регульовані електромагнітні системи 4 секторної форми. Радіальним переміщенням таких систем проходить переналагоджування патрону з діаметром робочої частини 470-700 мм. При цьому електричний

зв'язок штепсельних гнізд 6 з котушками забезпечується гнучкими спірально навитими проводами 5. [1]

Використання такого виду оснастки доцільно при масовому виробництві

Рис. 19. Патрон із регульованою електромагнітною системою

однотипних деталей, коли вартість його розробки і придбання компенсується об'ємами випущеної продукції, а час

його встановлення та налаштування знівелюється в загальному обсязі асу його використання. У випадку ж середньосерійного виготовлення деталей, така конструкція значно ускладнить процес виготовлення і збільшить собівартість виробу в декілька раз. Окрім того, переналагоджування на оснастку такого типу також понесе за собою додаткові фінансові та часові затрати, що є недоцільним.

1.4.2 Технологічне армування виробів.

Технологічне армування деталей проводять за допомогою самотвердіючих оборотних і необоротних речовин.

До необоротних самотвердіючих речовин відносять високов'язкі замазки, епоксидні смоли, пластмаси, стіракрил, рідке скло, цементи, клейові плівки. Ці речовини при кімнатній температурі перетворюються з рідкого в твердий стан, утворюючи адгезійно-когезійний зв'язок.

Перед армуванням для кращої заповнюваності знижують в'язкість речовин повільно протікає в часі конвенційним нагріванням.

Нежорсткі деталі високої точності дуже обмежено армують незворотними речовинами, тому що їх видалення вібрацією, розмолотом, механічним і високотемпературним впливом призводить до порушення форм деталей після механічної обробки.

Подібні недоліки відсутні або проявляються незначно при армуванні деталей самотвердіючими оборотними речовинами і намагнічуваними тілами. Серед них у виробництві найбільш поширені: сплав Вуда, технічна сечовина, ксиліт, поліетиленгліколь і тверді намагнічуючі тіла різної геометричної форми. Деякі характеристики армуючих речовин можна розглянути в Табл. 5.

Табл. 5. Деякі характеристики властивостей армуючих речовин [1]

Характеристики властивостей армуючих речовин	Оборотні речовини				Намагнічувані тіла		
	Сплав вуда	Полі-етиле-н-гліколь	Ксиліт	Сечовина	Кульк и 3 ⁻² мм	Штифт и Ø3мм, t=6мм	Призми 3х гранні 3х3х3мм
Опір зрушенню τ , гс/мм	36	20	45	35	0,13	0,4	0,4
Сила відриву q , гс/мм ²	6	8	5	10	0,2	0,5	0,6
Час затвердіння, год.	0,15	10	4	0,15	0,01-0,05		
Простій станка при загрузці і вигрузці середовища, год.	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4-0,6		
Токсичність	+	-	-	+	-	-	-
Дефіцитність	+	+	+	-	-	-	-

Практично міцність технологічного армування $N \leq qS_d k_3$, де k_3 - коефіцієнт запасу міцності, який приймається 1,5-3; q - критичні нормальні навантаження.

Міцність армованих зв'язків порушується і слабшає внаслідок усадки, розчинення речовин, викликаних дією вібрацій, механічних навантажень, температури, хімічних реакцій, а також електричних і магнітних полів [10, 11].

При технологічному армуванні нежорстких деталей до армуючим середовищам ставляться такі вимоги:

1. Мала усадка і повзучість, рівномірна міцність адгезійних і зчіплюються зв'язків, що забезпечують машинну обробку нежорстких деталей із застосуванням прогресивних режимів різання.
2. Низька щільність і висока текучість, що дозволяють вільно армувати важкодоступні елементи деталей без викривлення.
3. Можливість спрямованого локального армування деталей.
4. Висока швидкість оборотності станів речовин без використання громіздких допоміжних пристроїв і сильних теплових, електричних і магнітних полів.
5. Відсутність хімічної взаємодії з поверхнею і структурою деталей, інструменту та обладнання.
6. Повне зняття після обробки деталей армуючої речовини без зміни геометричної форми деталей і напруженого стану матеріалу.
7. Нетоксичність при розплавленні, розчиненні, затвердінні та армуванні деталей.
8. Висока стійкість до вологи і ЗОР. Низька вартість і недефіцитність в народному господарстві. [1]

Використання армуючих покриттів однозначно покращує процес обробки нежорстких деталей, але сказати, що це рішення є однозначно правильним складно, придбання нетоксичних для робітників сумішей може викликати деякі проблеми зв'язані з дефіцитом даного товару на ринку, у випадку ж з токсичними, потрібно забезпечити робітників відповідним обладнанням для нешкідливої роботи з покриттями, причому закупівля всього необхідного для такого методу обладнання значно збільшить вартість вироблення, що навряд чи буде нас задовільняти. Навіть якщо не зважати на

описану вище проблему, вирішення питання таким методом для середньосерійного виготовлення є недоцільним, оскільки збільшення загального часу оброблення деталей зростає в рази, за рахунок того допоміжного часу, який буде витрачатись на підготовку деталей для обробки. Крім цього точність виробу може значно знизитись за рахунок нерівномірного покриття заготовки армуючим шаром.

Підсумовуючи вищесказане можна стверджувати, що дані методи мають право на існування, та вони занадто специфічні і для наших умов оброблення не підійдуть. Основними проблемами даних методів є:

Дороговизна та специфічність використовуваної оснастки, що закономірно вплине і на собівартість виробу;

Необхідність в додатковій оснастці, що зменшить вільні площі нашого цеху, іще більше збільшить вартість виробу і потребує окремого спеціаліста, який буде нею займатись;

Збільшення часу оброблення. Ледь не найбільшу долю впливу на вибір вирішення завдання є час обробки і такі довготривалі варіанти нас не влаштують

Тому використання наведених в даному підручнику методів обробки нежорстких кілець нас не влаштують, хоча, за певних умов, використовувати їх все ж доцільно.

1.5 Автоматизація вибору раціональних режимів токарної обробки тонкостінних деталей. Про «м'які» режими різання

1. У статтях під авторством Жаргалової А.Д. та Єремєйкіна П.А., а також Жаргалової А.Д., Гаврюшина С.С., Лазарченка Г.П. та Семисалова В.І. було розглянуто проблему призначення раціональних режимів різання при точінні тонкостінних заготовок, оскільки на точність результату обробки істотний вплив мають деформації заготовки, викликані силами закріплення і різання. Обробка деформованої деталі призводить до значних відхилень від заданих розмірів[12].

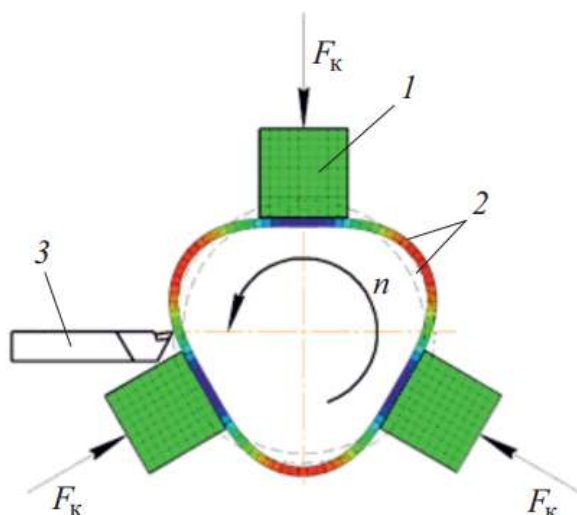


Рис. 20. Деформація деталі при токарній обробці в трьох кулачковому патроні

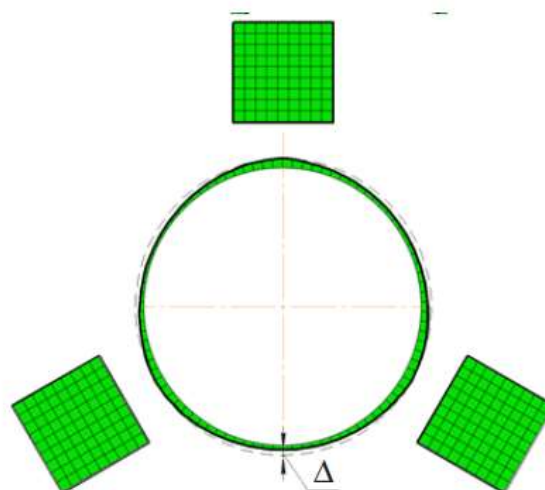


Рис. 21. Результати обробки тонкостінної деталі

Тонкостінні деталі (далі - ТСД), як правило, характеризуються зниженою механічною жорсткістю. У зв'язку з цим механічна обробка ТСД пов'язана з високим ризиком виникнення браку від неприпустимо великих технологічних деформацій деталі під дією сил різання і закріплення. Тому при механічній обробці таких деталей зазвичай застосовують спеціальні верстатні пристосування, які в парі «деталь - спеціальне пристосування», підвищують жорсткість ТСД до величин, які можна порівняти з жорсткістю монолітних виробів.

Обробка тонкостінних заготовок потрібна в різних галузях промисловості, при цьому виникає ряд проблем, пов'язаних з визначенням методів обробки. Зазначені проблеми в своїй основі мають таку суперечність: спосіб виготовлення деталі необхідно вибрати таким чином, щоб, з одного боку, забезпечити її високу якість, а з іншого - мінімізувати собівартість. Рішення такого роду проблем особливо актуально, наприклад, при виробництві виробів аерокосмічної промисловості [13], де випуск продукції зводиться до одиниць виробів.

Технологія обробки ТСД в системі «деталь - спеціальне пристосування» має важливу перевагу. При такому підході, для виготовлення ТСД можна застосовувати рекомендовані режими механічної обробки, перевірені досвідом їх практичного застосування і добре освоєні в машинобудівному виробництві. Однак використання спеціальних пристосувань неминуче призводить до суттєвих додаткових витрат часу і коштів на індивідуальну розробку і виготовлення такої технологічної оснастки.

Паралельно із застосуванням спеціальних пристосувань, вивчається можливість обробки ТСД в стандартних пристроях [15]. При цьому виходять з того, що в залежності від конструкторського вирішення конкретного тонкостінної деталі, пружна податливість ТСД може проявлятися в різному ступені. У зв'язку з цим представляється логічним розглядати різні потенційно існуючі можливості обробки ТСД, включаючи обробку в універсальних пристроях із застосуванням «м'яких» режимів. Домовимося тут і далі застосовувати термін «м'який» режим, маючи на увазі при цьому такий режим різання, при якому сила різання має меншу величину в порівнянні з силою різання при обробці в класичних умовах[14].

2. Запропонований метод «м'яких» режимів різання розроблявся на основі експериментів, які проводились задля отримання вибірки даних, на основі якої буде проведено аналіз особливостей оброблення, та запропонована модель «поведінки» при виникненні такої ситуації. Також данні можуть бути використані в розробці наступних поколінь CAD-, CAM- систем.

При дослідженнях залежності сили різання від режиму обробки було визначено, що технологічне деформування ТСД обумовлено двома групами факторів - силою різання і силами закріплення деталі в пристосуванні. Причому у випадках мінімізації технологічних силових навантажень на оброблювану деталь активна роль належить силі різання і мінімально достатні для утримання деталі в пристосуванні сили закріплення залежать від сил різання. У зв'язку з цим при вивченні «м'яких» режимів різання в умовах прийнятих обмежень, в

якості ведучого технологічного фактору, був прийнятий параметр сили різання[14].

Відповідно до існуючих наукових уявлень [16-18], при токарній обробці, розрахункова величина сили різання P описується формулою:

$$P = \{P_z, P_x, P_y\} \quad (23)$$

де: P_z - тангенціальна складова сили різання; P_x - осьова складова сили різання; P_y - радіальна складова сили різання.

Залежність компонентів P_z, P_x, P_y сили різання від технологічних умов процесу точіння може бути описана емпіричними залежностями

$$\begin{aligned} P_z &= 100 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot V^n \cdot k, \\ P_x &\approx 0,35P_z, \\ P_y &\approx 0,45P_z, \end{aligned} \quad (24)$$

де: P_x, P_y, P_z - компоненти сили різання, Н; t, s, V - технологічні параметри режиму різання: t - глибина різання, мм, s - подача різця, мм/об, V - швидкість різання, м/мін; C_p, x, y, n - емпіричні коефіцієнти; k - коефіцієнти поправки на матеріал оброблюваної деталі.

Залежність швидкості різання V від умов обробки, в свою чергу, описується співвідношенням

$$V = C_v K_v / T^m t^x s^y \quad (25)$$

де: T - період стійкості інструменту, хв; t - глибина різання, мм; s - подача різця, мм / об; C_v, x, y, m - емпіричні коефіцієнти; K_v - коефіцієнт поправки на матеріал оброблюваної деталі.

Співвідношення (23, 24) дозволяють виділити в загальній множині технологічних параметрів, що визначають величину сили різання, два підмножини: (а) варіативні параметри режиму різання $\{t, s, V\}$, значення яких можуть активно змінюватись при налаштуванні верстата і при роботі верстата по керуючої програмою; (б) - статичні параметри $C = \{C_p, C_v, T, x, y, m, n, k, K_v\}$, значення яких в процесі обробки деталі залишаються незмінними. Статичні параметри задають технологічний контекст умов обробки і в

розв'язуваної нами задачі можуть розглядатися як постійні елементи комплексної константи Z досліджуваного процесу. З урахуванням цього для аналізу можливостей активного управління силою різання P при вивченні поняття «м'який» режим різання можна обмежитися дослідженням мультиплікативної залежності (26), в якій варійовані параметри t , s , V є аргументами, а емпіричні величини x , y , n грають роль коефіцієнтів вагомості цих аргументів:

$$P = C(t^x \cdot s^y \cdot V^n), \quad (26)$$

Тут C - комплексна константа умов обробки; t , s , V - змінні технологічні параметри режиму різання; x , y , n - емпіричні коефіцієнти вагомості параметрів t , s , V [14].

Після проведеного експерименту і побудови всіх відповідних графіків було визначено, що на заданому експериментом [14] відрізку показників, змінні t , s , V можуть знизити значення сили P на величини $\Delta P(t)=23\%$, $\Delta P(s)=40\%$, $\Delta P(V)=27\%$, а відповідно, певна комбінація всіх змінних може призвести до 2х разового зниження сили різання P .

Таким чином данні отриманні у експерименті дають підстави для розгляду процедури зміни параметрів $\{t, s, V\}$, що безпосередньо вплине на зміну сили різання P , як засобу для реалізації «м'яких» режимів різання, що безпосередньо змінить умови виникнення технологічних деформацій ТСД.

3. Щодо визначення власне самих режимів, то питання не має однозначного рішення оскільки кожні умови унікальні і вибір необхідних для даного умов, падає на плечі експериментального методу.

Якщо ж розглядати задачу з математичної точки зору, то, для задовільного результату, необхідно врахувати такі параметри, як задана форма та розміри деталі, схема закріплення деталі, фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу та тип ріжучого інструменту. За допомогою цих даних можна, відповідно, знайти необхідні параметри «м'яких» режимів

різання, що дозволить отримувати деталі з деформаціями в межах допустимих значень.

Важливим моментом є моделювання прогнозованих деформацій за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Тобто, першочергово моделюють деформацію деталі за умови використання рекомендованих режимів різання $[P]$, потім вивчивши деформації, розраховують прогнозоване значення сили різання P , яке дозволить обробити деталі з деформаціями в межах допустимого (або і взагалі без деформацій). Наступним кроком необхідно, за допомогою зміни режиму або режимів $\{t, s, V\}$, необхідно досягнути необхідного значення P [14].

Описати такий процес можна за допомогою такої функції:

$$(P(t, s, V) < [P]) \rightarrow \max, \quad (27)$$

При чому у розрахунках необхідно враховувати обмеження:

$$\begin{aligned} P &= C \cdot (t^x \cdot s^y \cdot V^n), \\ C, x, y, n &\rightarrow \text{const}, \\ S, t, V &\rightarrow \text{var}, \\ [s]^{\min} < s < [s]^{\max}, s &> 0, \\ [t]^{\min} < t < [t]^{\max}, t &> 0, \\ [V]^{\min} < V < [V]^{\max}, V &> 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Де $[s]^{\min}$, $[s]^{\max}$, $[t]^{\min}$, $[t]^{\max}$, $[V]^{\min}$, $[V]^{\max}$ - максимальні обмеження режимів різання $\{t, s, V\}$ за технологічними властивостями верстату і використовуваного інструменту [14].

Необхідно розуміти, що сучасний інструмент зі змінними пластинами має певні обмеження щодо його використання, і якщо верхня межа його обмежень нас не дуже цікавить, то нижня породжує деякі проблеми, які можна вирішити лише комбінованою зміною параметрів.

Якщо підсумувати все вище сказане, то ми отримуємо такі результати:

- Зміною режимів різання $\{t, s, V\}$, можна досягнути зниження власне сили різання P , що дозволить зменшити силу затиску в патроні, а це відповідно

зменшить деформації від сил різання, та деформації зажиму в патроні до допустимих меж.

- Застосування методу м'яких режимів, дозволяє не затрачувати додаткові кошти на закупівлю та час на впровадження в процесі виробництва, тому його вплив на собівартість виробу після обробки мінімальним.

Але є і певні недоліки такого методу:

- Основною проблемою стане постійна трата додаткового часу на впровадження кожної деталі і певну кількість розрахунків, які за певних умов, як то неможливість змінити певний параметр через обмеження системи, можуть не дати необхідного результату.

- Зміна режимів різання може бути недопустимою з технологічної сторони. Все ж, виріб має певні задані вимоги, дотримання яких є основною ціллю обробки, а значне зниження режимів різання може безпосередньо вплинути на якість оброблених поверхонь.

- Окрім трати часу на розрахунки та впровадження негативний вплив має також затримка роботи станка. Знижені режими призведуть до збільшення часу оброблення, а це в свою сторону збільшить вартість виробу за рахунок зменшення кількості деталей на акумулятивну верстатогодину.

Все ж я вважаю, що метод «м'яких» режимів різання є оптимальним для одиничного або малосерійного виробництва, тому що у випадку випуску різної, але типової номенклатури можна, за рахунок введення поправочних коефіцієнтів, без додаткових затрат часу та коштів на спеціальну оснастку, отримувати вироби достатньої якості, та конкурентної ціни.

1.6 Типова оснастка для обробки тонкостінних кілець

Оскільки потреба в деталях типу тонких кілець і труб виникла досить давно, то і проблема їх оброблення не нова. До розробки та проектування спеціально орієнтованого на такі потреби патрону деталі вже оброблялись і відповідно допуски та посадки необхідно було дотримуватись іще тоді.

1.6.1 Розрізні втулки.

Народні вмільці та провідні інженери доклали сумісних зусиль для вирішення такої потреби, та зрозуміли, що досягти отримання необхідних точносних характеристик можна декількома шляхами, наприклад, збільшенням жорсткості вузла деталь-кулачок, за рахунок скажімо, перехідного елемента, який умовно збільшить товщину стінки деталі до необхідного значення. На практиці, такий спосіб реалізують за допомогою розрізних втулок (Рис. 22.), які за рахунок щільної посадки та спеціального розрізу по довжині втулки здатні зафіксувати деталь для подальшої обробки. Різні конфігурації таких втулок дозволяють оброблювати деталь, як по зовнішній поверхні так і по внутрішній. Такий метод є самим популярним на теренах після-радянського простору, за рахунок його дешевизни і простоти у втіленні на практиці.

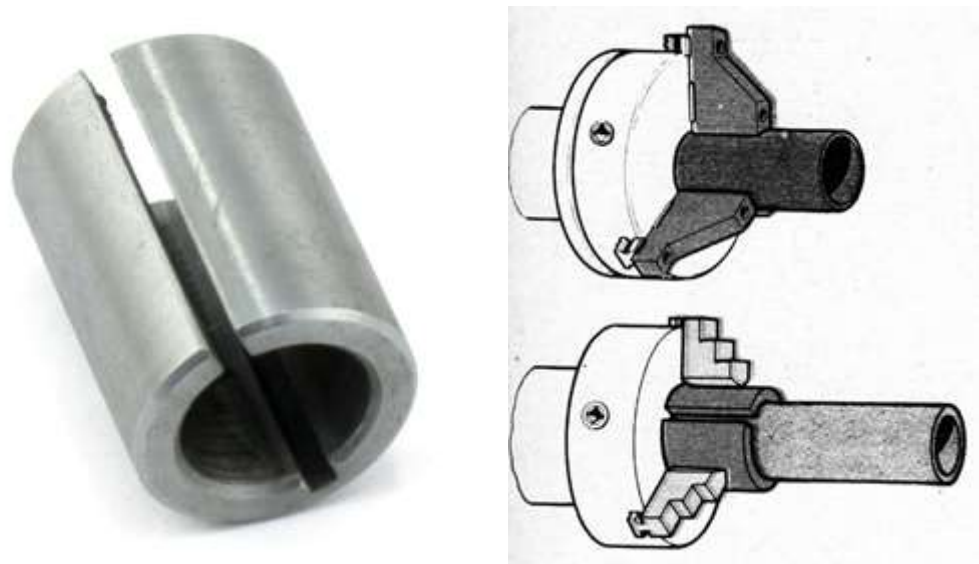


Рис. 22. Розрізна втулка та принцип її роботи

Проте такий метод має деякі значні недоліки серед яких:

- Необхідність виготовлення допоміжної втулки для кожного типорозміру деталі. Тобто для забезпечення обробки широкої номенклатури тонкостінних виробів необхідно підготувати широкий діапазон розрізних втулок під кожен діаметр оброблюваної деталі.

- Зростання сумарної похибки базування деталі. Збільшення перехідних елементів у вузлі відповідно збільшує і сумарну похибку базування, що на пряму впливає на похибку оброблення. Задля вирішення такого питання необхідно використовувати або посадку з натягом, що може бути недопустимо

деякими технологічними вимогами, або покращувати процес виготовлення самої втулки, що не нівелює похибку, але може її зменшити, проте такий варіант вирішення збільшить розрахункову собівартість всього виробу.

- Неможливість або складність при обробці зовнішніх поверхонь на малих діаметрах деталі. Малі діаметри можуть стати завадою при обробці кілець, оскільки діапазону розкриття втулки може просто не вистачити для затиску відповідної заготовки, а посадка з натягом, може бути недопустимою.

1.6.2 Швидкозмінні універсальні кулачки для токарних патронів.

Відносно недавно з'явилась спрощена конструкція токарного патрону (Рис. 23.), призначеного для затиску деталей за допомогою широких кулачків. Особливістю конструкції стали шестигранні токарні кулачки, які можна адаптувати під потреби власного виробництва. В основі лежать звичайні сирі кулачки зміненої форми, які розточують до потрібних діаметрів. Такі кулачки переміщуються по направляючих, які розташовані на передньому торці токарного патрону і фіксуються за допомогою одного гвинта. Процес зміни робочого діаметру здійснюється за допомогою відкручування одного гвинта і повороту на дискретне значення кулачка. Таким чином конструктивно патрон здатен забезпечити обробку певної кількості (в даному випадку п'ять) деталей за принципом обхвату широких кулачків, плюс одна грань відходить на універсальну фіксацію, що дозволяє оброблювати більш широкий діапазон деталі без зміни кулачків.



Рис. 23. Конструкція токарного патрону із універсальними кулачками
До недоліків такого патрону можна віднести

- Ручний принцип дії. Зажим та зміна необхідної сторони кулачка відбувається вручну, проте, в порівнянні із спеціальними патронами типових компоновок, процес зміни всеодно відбувається швидше.
- Не систематизованість номенклатури. Під необхідні діаметри необхідно розточувати кулачки, або ж чекати поки це зробить виробник.
- Обмеженість розмірами кулачків або ж обмеження на кількість обертів деталі. Тут два випадки, або такі кулачки не зможуть в повній мірі забезпечити затиск необхідних деталей, в силу обмеження за габаритами, або ж збільшення габариту кулачків призведе до збільшення загальної ваги вузла-патрон деталей, що може накласти відбиток на допустимі режими обробки деталей.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ФОРМУВАННЯ ДАНИХ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ ТА ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИН ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для повноцінної картини, яка б могла описати поставлену перед нами задачу необхідно детально дослідити обробку тонкостінних кілець за різних режимів різання та, відповідно з різними умовами зажиму в токарних патронах. Такий дослід дозволить стверджувати про певну систематизацію результатів оброблення або ж абсолютну хаотичність отриманих результатів.

Дослідження буде проводитись при трьох різних видах обробки: чорнова, напів- та чистова відповідно. У відповідності до цих умов будуть змінюватись і режими різання. Використовувати будемо розточні різці фірми Куосега, Японського виготовлення, а проводити експеримент будемо на токарному верстаті фірми HAAS модель ST-10 (США).

Оскільки точити будемо звичайні тонкостінні кільця, особливої геометрії різця не потребуватиметься, тож нами було обрано різець з ромбовидною пластиною та кутом до оброблюваної поверхні у 95° . Точити будемо тонкостінні кільця в діапазоні діаметрів від 40 до 60мм, тому можемо обирати різець максимального розміру з мінімальним діаметром отвору 27мм (Рис. 22), характеристики різця наведені на Рис. 23. Пластина зображена на Рис. 24.

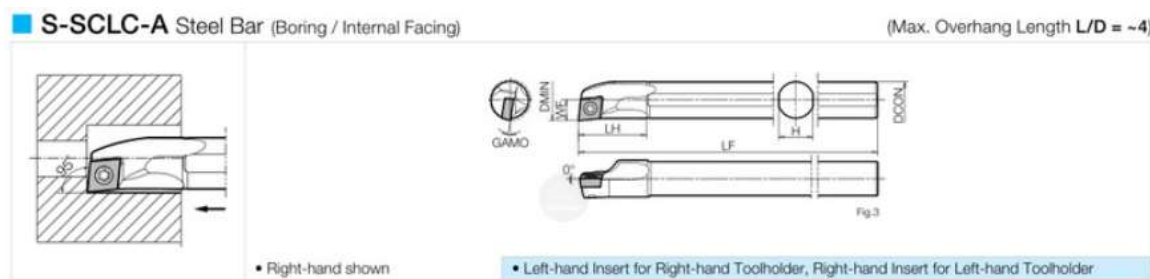


Рис. 24. Різець розточний з ромбічною пластиною

Part Number	Stock		Unit	Min. Bore Dia.	Dimensions					GAMO
	R	L			DMIN	DCON	H	LF	LH	WF
S08X-SCLC% 06-10A	●	●	mm	10	8	7.0	120	16	5.0	14°
S10L-SCLC% 06-12A	●	●		12	10	9.0	140	20	6.0	12°
S12M-SCLC% 06-14A	●	●		14	12	11.0	150	24	7.0	10°
S16Q-SCLC% 09-18A	●	●		18	16	15.0	180	30	9.0	10°
S20R-SCLC% 09-22A	●	●		22	20	19.0	200	36	11.0	8°
S25S-SCLC% 09-27A	●	●		27	25	24.0	250	46	13.5	6°

Рис. 25. Характеристики обраного розточного різця

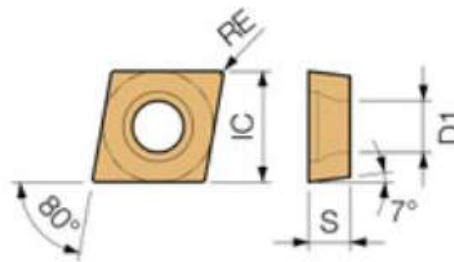


Рис. 26. Ескіз пластини

Рекомендовані виробником пластини режими наведені на Рис. 27.

Recommended Cutting Conditions - Boring (Positive Insert: Cutting Dia. over 10mm)

ISO Classification	Workpiece Material	Hardness	Cutting Range	Corner-R (re)	Lower Limit - Recommendation - Upper Limit		
					Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/rev)
P	Medium-carbon Steel Medium-carbon Alloy	HB ≤ 300	Precision Finishing	0.2	150 - 200 - 250	0.05 - 0.3 - 0.5	0.03 - 0.1 - 0.15
				0.4	120 - 140 - 170	0.05 - 0.3 - 0.5	0.03 - 0.1 - 0.15
			Finishing	0.4	150 - 200 - 250	0.2 - 0.5 - 1.0	0.05 - 0.1 - 0.2
				0.4	120 - 180 - 200	0.2 - 0.5 - 1.0	0.05 - 0.1 - 0.2
			Finishing-Medium	0.4	120 - 180 - 220	0.5 - 1.0 - 2.0	0.1 - 0.15 - 0.25
				0.4	100 - 150 - 200	0.5 - 1.0 - 1.5	0.1 - 0.15 - 0.2
			Medium	0.8	100 - 150 - 200	1.0 - 1.5 - 2.5	0.1 - 0.15 - 0.3
				0.8	80 - 120 - 150	1.0 - 1.5 - 2.0	0.1 - 0.15 - 0.2

Рис. 27. Рекомендовані режими різання за каталогом

У відповідності з наведеними в каталозі даними можна розрахувати загальну

силу зажиму деталі в трьох кулачковому патроні для різних етапів обробки.

Загальна сила різання визначається за формулою:

$$P = \{P_z, P_x, P_y\}, \quad (29)$$

де P_z, P_x, P_y відповідно сили різання, які в свою чергу визначаються, як:

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot V^n \cdot k,$$

$$P_x \approx 0,35P_z, \quad (30)$$

$$P_y \approx 0,45P_z,$$

H ; t , s , V - технологічні параметри режиму різання: t - глибина різання, мм, s - подача різця, мм/об, V - швидкість різання, м/мін; C_p , x , y , n - емпіричні коефіцієнти; k - коефіцієнти поправки на матеріал оброблюваної деталі.

Отже, враховуючі рекомендовані каталогом значення та користуючись приведеними в [12] формулами ми можемо визначити силу різання для чорнового, напів- та чистового типів точіння при обробці жорстких деталей, та відповідно розрахувати силу різання при мінімальних запропонованих виробником режимах різання. За основу розрахунків приймемо розрахунок режимів із [41], там же за таблицями підберемо всіх недостаючих для повного розрахунку коефіцієнтів, як результат отримаємо $C_p=300$, $k=0,74$ данні наведені в Табл. 6.

Табл. 6. Дані розрахунку сил різання

Тип обробки	Швидкість різання V_c (м/хв)	Коефіцієнт n	Подача S (мм/об.)	Коефіцієнт y	Глибина різання t (мм)	Коефіцієнт x	Сила різання P_z	Сила різання P_x	Сила різання P_y
Чорнове точіння	150	-0,15	0,15	0,75	1,5	1	373,4	130,7	168,03
Напівчистове точіння	180		0,15		1,0		242,3	84,8	109,04
Чистове точіння	200		0,1		0,5		88	30,8	39,6
Чорнове точіння (нижня границя)	100		0,1		1,0		195,2	68,25	87,84
Напівчистове точіння (нижня границя)	120		0,1		0,5		94,95	33,25	42,73
Чистове точіння (нижня границя)	150		0,05		0,2		21,9	7,67	9,86

Оскільки в межах однієї обробки перезажим призведе до зменшення точності і утворенню похибок базування під час обробки деталей будемо обробляти за одну установку, тобто враховувати будемо сили при чорновій обробці, як найбільші за значенням.

Для розрахунку сили зажиму скористаємось типовою схемою описаною в [42]. Сила P_z – має найбільшу абсолютну величину при точінні і діє по дотичній до заготовки, вона намагається повернути заготовку навколо її осі. Радіальна сила P_y – в залежності від умов обробки становить $0,3 \dots 0,9 P_z$ і діє по нормалі до оброблюваної поверхні від периферії до центру заготовки. Їй протидіють реакції кулачків. Так як радіальна сила не викликає зміщення заготовки то, звичайно, на розрахунковій схемі реакції не показуються. Осьова сила P_x – в залежності від умов обробки становить $0,1 \dots 0,7 P_z$ і діє в напрямку вісі інструменту. При цьому намагається змістити заготовку уздовж осі.

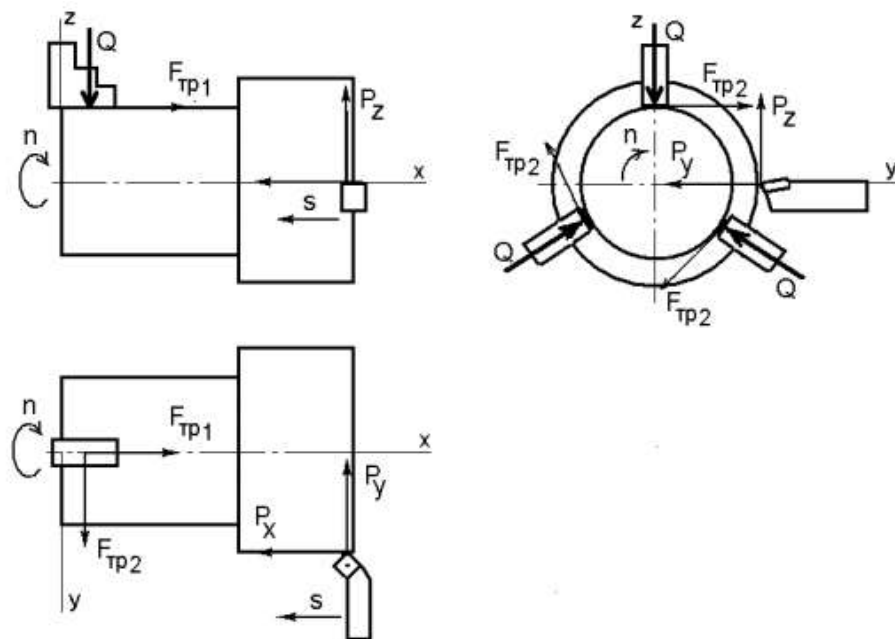


Рис. 28. Розрахункова схема розміщення сил при затиску деталі в 3х кулачковому патроні

Закріплення заготовки здійснюється силою закріплення Q , що прикладається до заготівлі від кулачків патрона. При цьому значення сили закріплення повинно бути таким, щоб виключалася можливість повороту заготовки в патроні від дії окружної сили, її зміщення вздовж осі, що викликається осьовою силою. Можливість повороту заготовки навколо осі OX в патроні і її зміщення вздовж осі OX виключається завдяки дії сил тертя F_1 і F_2 . Вони виникають в результаті дії сили закріплення в місці контакту кулачків

патрона з базовою поверхнею заготовки. Причому її частина Q_1 протидіє повороту заготовки навколо її осі, а Q_2 протидіє зміщенню заготовки уздовж осі.

Тоді, з алгоритму розрахунку сили закріплення (Рис. 28) сила закріплення складе:

$$Q = k\sqrt{Q_1^2 + Q_2^2} \quad (31)$$

де Q_1 - частина сили закріплення протидіє повороту заготовки навколо осі; Q_2 - частина сили закріплення протидіє зміщенню заготовки уздовж осі; k - коефіцієнт запасу.

Для забезпечення нерухомості заготовки під дією всіх зовнішніх сил складемо рівняння статичної рівноваги:

$$\Sigma M_{OX} = nF_{\text{тр}1} \frac{D_2}{2} - P_Z \frac{D_1}{2} = 0 \quad (32)$$

$$\Sigma P_{OX} = nF_{\text{тр}2} - P_X = 0 \quad (33)$$

де n - число кулачків патрона, для трьохкулачкового патрона $n = 3$; D_1 - діаметр оброблюваної поверхні; D_2 - діаметр базової поверхні.

Як бачимо, в двох рівняннях повністю компенсовано дію всіх зовнішніх сил, що збурюють (складових сил різання). З об'ємних сил діє тільки вага заготовки, яка має незрівнянно меншу величину ніж інші зовнішні сили.

Підставляємо в рівняння (32) і (33) значення сили тертя.

$$F_{\text{тр}} = fQ \quad (34)$$

де f - коефіцієнт сили тертя.

Тоді, вирази (32) та (33) набувають виду:

$$\Sigma M_{OX} = 3fQ_1 \frac{D_2}{2} - P_Z \frac{D_1}{2} = 0 \quad (35)$$

$$\Sigma P_{OX} = 3fQ_2 - P_X = 0 \quad (36)$$

З рівнянь (35) та (36) знаходимо:

$$Q_1 = \frac{P_Z D_1}{3f D_2}, \quad (37)$$

$$Q_2 = \frac{P_X}{3f} \quad (38)$$

Підставляючи значення сил тертя з рівнянь (37) і (38) в рівняння (31), отримаємо формулу для розрахунку сили закріплення:

$$Q = k \sqrt{\left(\frac{P_z D_1}{3f D_2}\right)^2 + \left(\frac{P_x}{3f}\right)^2} \quad (39)$$

Розрахунок будемо проводити для обробки кільця з внутрішнім діаметром заготовки $D_1=30\text{мм}$ та оброблювати будемо до товщини стінки в 2мм та $D_2=36\text{мм}$. Тоді, для чорнової обробки при стандартних режимах різання необхідна сила затиску буде складати:

$$Q = 1,5 \sqrt{\left(\frac{373,4 \cdot 30}{3 \cdot 0,2 \cdot 33}\right)^2 + \left(\frac{130,7}{3 \cdot 0,2}\right)^2} = 909,37 \text{ (Н)}$$

А для мінімальних режимів різання відповідно:

$$Q = 1,5 \sqrt{\left(\frac{195,2 \cdot 30}{3 \cdot 0,2 \cdot 32}\right)^2 + \left(\frac{68,25}{3 \cdot 0,2}\right)^2} = 488,28 \text{ (Н)}$$

Виходячи з теоретичних розрахунків випливає, що сила затиску, яка утворює основні деформації на тонкостінній деталі, при використанні мінімальних режимів різання знижується майже в два рази, що дозволяє нам продовжити дослідження на етапі моделювання, та експерименту для перевірки та підтвердження даної інформації, та наведення подальших практичних рекомендацій для користування.

За аналогією розрахуємо і значення відповідних сил для різних випадків затиску, як то затиск у трьох-, чотирьох- та шестикулачкові патрони, та різних конфігурацій кулачків, як то типові та широкі.

Для наглядного розуміння ситуації оброблення проведемо розрахунки сили затиску також і для шестикулачкового патрону, який оснащено широкими профільними кулачками (розробленими спеціально під обробку одного діаметру заготовки. Тоді відповідно Q для стандартних режимів різання буде дорівнювати:

$$Q = 1,2 \sqrt{\left(\frac{373,4 \cdot 30}{6 \cdot 0,5 \cdot 33}\right)^2 + \left(\frac{130,7}{6 \cdot 0,5}\right)^2} = 146,22 \text{ (Н)}$$

, а для занижених режимів значення сили затиску Q буде складати:

$$Q = 1,2 \sqrt{\left(\frac{195,2 \cdot 30}{6 \cdot 0,5 \cdot 32}\right)^2 + \left(\frac{68,25}{6 \cdot 0,5}\right)^2} = 97,7 \text{ (Н)}$$

Значення коефіцієнту запасу та коефіцієнту сили тертя було змінено, оскільки в умовах затиску деталі у вузлі спец.кулачок-деталь лінія контакту переходить у площу, і відповідно значення величин коефіцієнтів можна збільшити без втрат у продуктивності затиску.

Відповідно до отриманих при розрахунках даних можна стверджувати, що зарахунок зміни режимів різання та умов затиску в системі кулачок-деталь можна досягти місцевої зменшення сили затиску до 10-ти разів, що дозволяє зменшити деформації деталі до меж допустимих технологічним завданням.

3. ПРОВЕДЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИНИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Експеримент буде проводитись у віртуальному та реальному середовищі.

Мета - дослідження процесу обробки тонкостінних кілець, деформацій форми деталі в процесі обробки за рахунок сил затиску та впливу на процес деформацій кількості кулачків та площі їх контакту з деталлю.

Віртуальну частину дослідження будемо проводити в середовищі SolidWorks Simulation, де буде проведено аналіз деформацій тонких кілець при змінних умовах затиску, як то різна сила затиску, різна кількість кулачків та, відповідно, різна площа контакту кулачка з деталлю.

Прикладну частину дослідження будемо проводити на сучасному верстаті з ЧПК виробництва фірми HAAS із використанням сучасного інструменту Kyocera та вимірювального обладнання SARA.

3.1 Моделювання процесу затиску деталі у віртуальному середовищі.

Для об'єктивної оцінки природи деформацій змодельємо процес оброблення для різних типорозмірів деталі із однакової товщиною стінки. В процесі моделювання будемо змінювати:

- Режими різання. Зменшення режимів різання в межах рекомендованого виробником інструменту діапазону дозволяє впливати на силу затиску деталі у токарному патроні.
- Кількість кулачків в токарному патроні. Зміна конфігурації токарного патрона дозволяє розподілити необхідну сумарну силу затиску на більшу частину заготовки, що зменшить точкові деформації деталі.
- Площу контакту. Будемо розглядати два типи компоновки токарних патронів, із універсальними кулачками та малою зоною контакту, та із

«спеціальними» кулачками спроектованими саме для оброблення тонкостінних деталей.

- Діаметри оброблюваних кілець. Будуть оброблюватись кільця із зовнішнім діаметром в діапазоні розмірів від 30 до 80мм та товщиною стінки в 2мм.

Отримані дані будуть занесені в результуючу таблицю, по ним буде проведено аналіз та дані висновки.

Моделювання в середовищі SolidWorks показано для трьох типорозмірів деталей із габаритами Ø40мм, Ø50мм та Ø60мм і товщиною стінки 2мм. Ескізи деталей наведені на Рис.29., Рис.30. та Рис.31. відповідно.

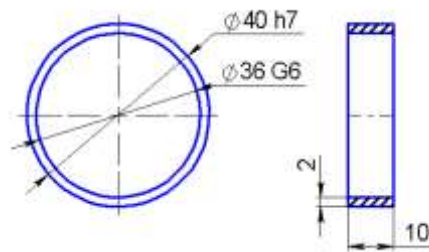


Рис. 29. Ескіз деталі «Кільце 1»

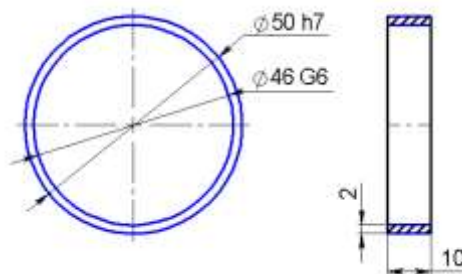


Рис. 30. Ескіз деталі «Кільце 2»

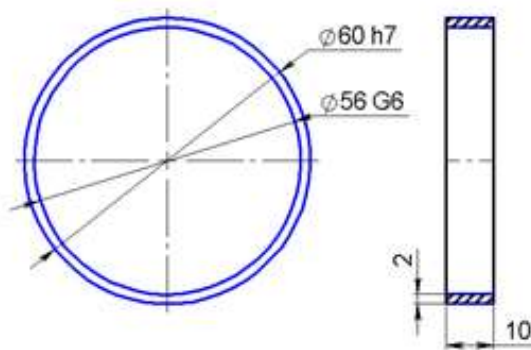


Рис. 31. Ескіз деталі «Кільце 3»

Результати моделювання показані для деталі «Кільце 1» показані на Рис.32-41. Отриманні результати наведені в Табл. 7.

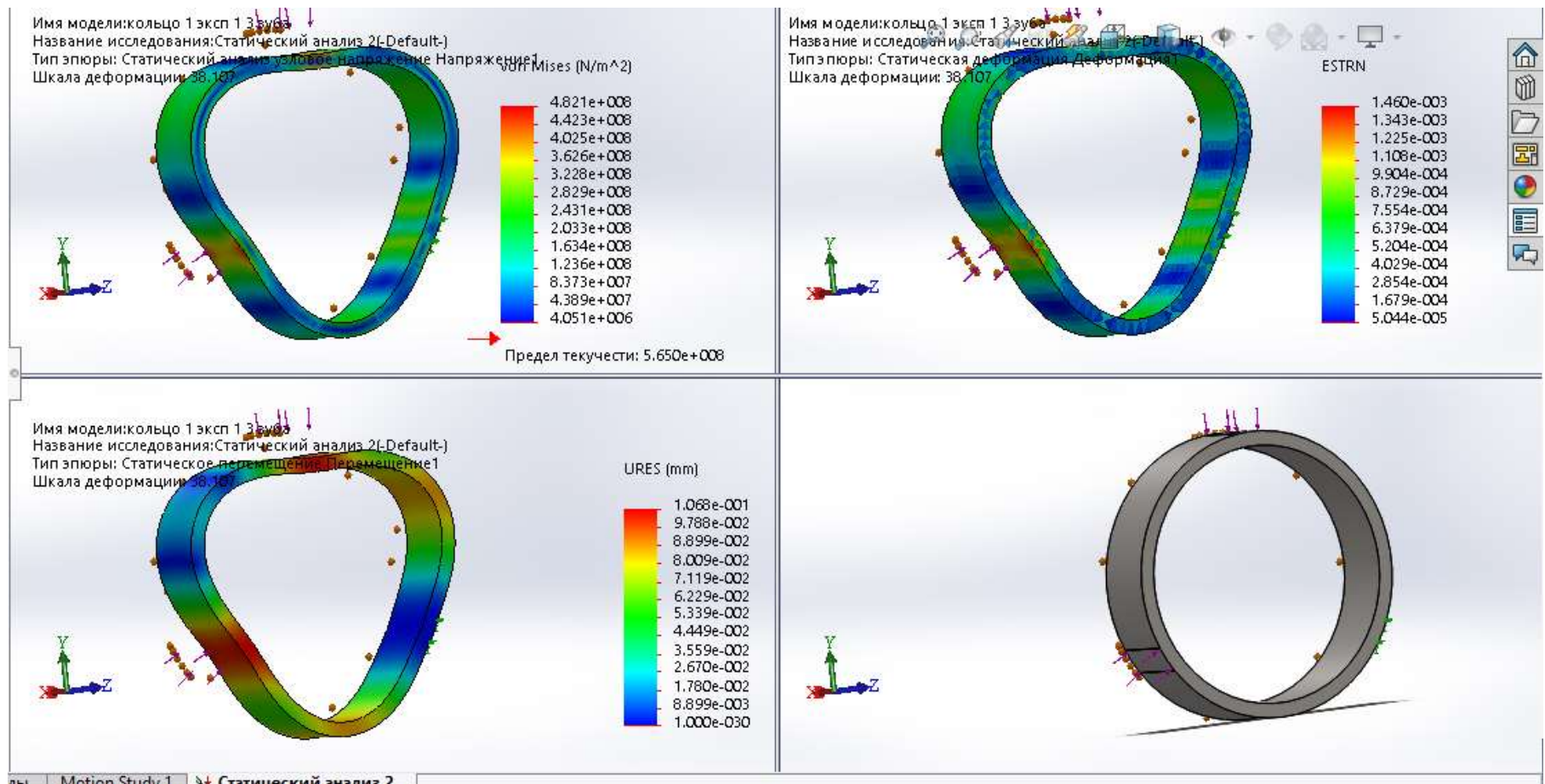


Рис. 32. Результати отримані при моделюванні за умов нормальних режимів різання, затиску у трьох-кулачковому патроні із стандартною конфігурацією кулачків

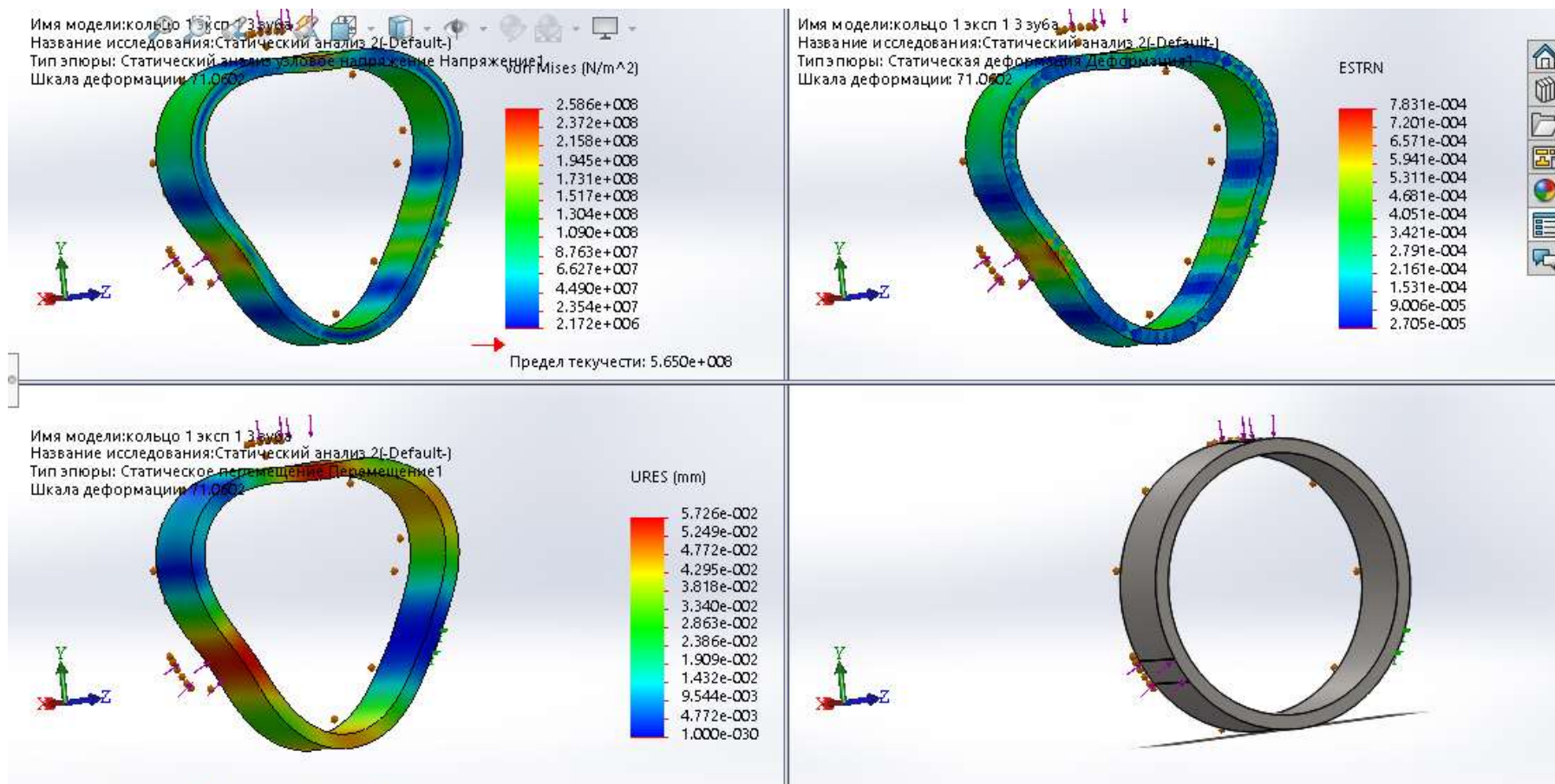


Рис. 33. Результати отримані при моделюванні за умов мінімальних режимів різання, затиску у трьох-кулачковому патроні із стандартною конфігурацією кулачків

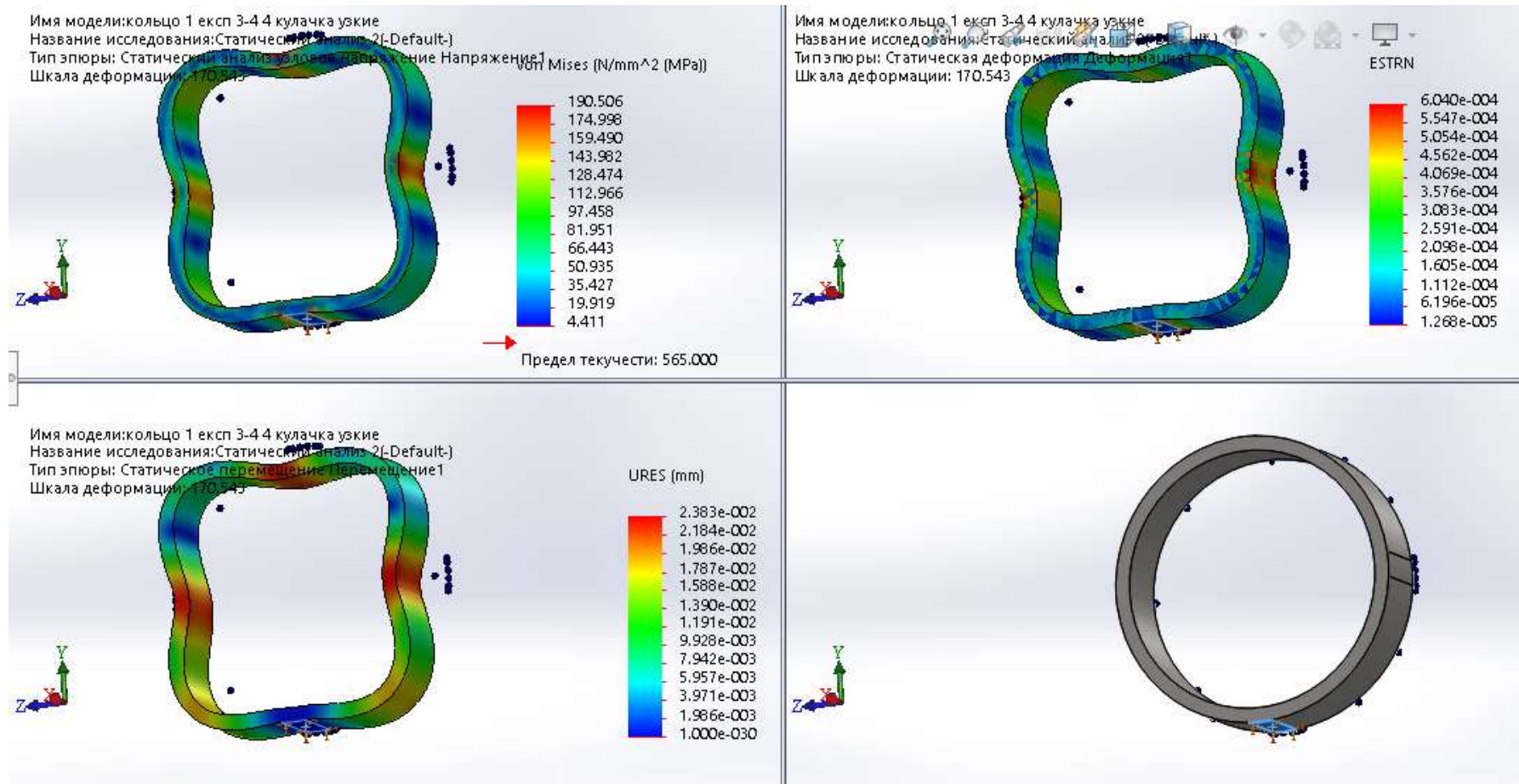


Рис. 34. Результати отримані при моделюванні за умов нормальних режимів різання, затиску у чотирьох-кулачковому патроні із стандартною конфігурацією кулачків

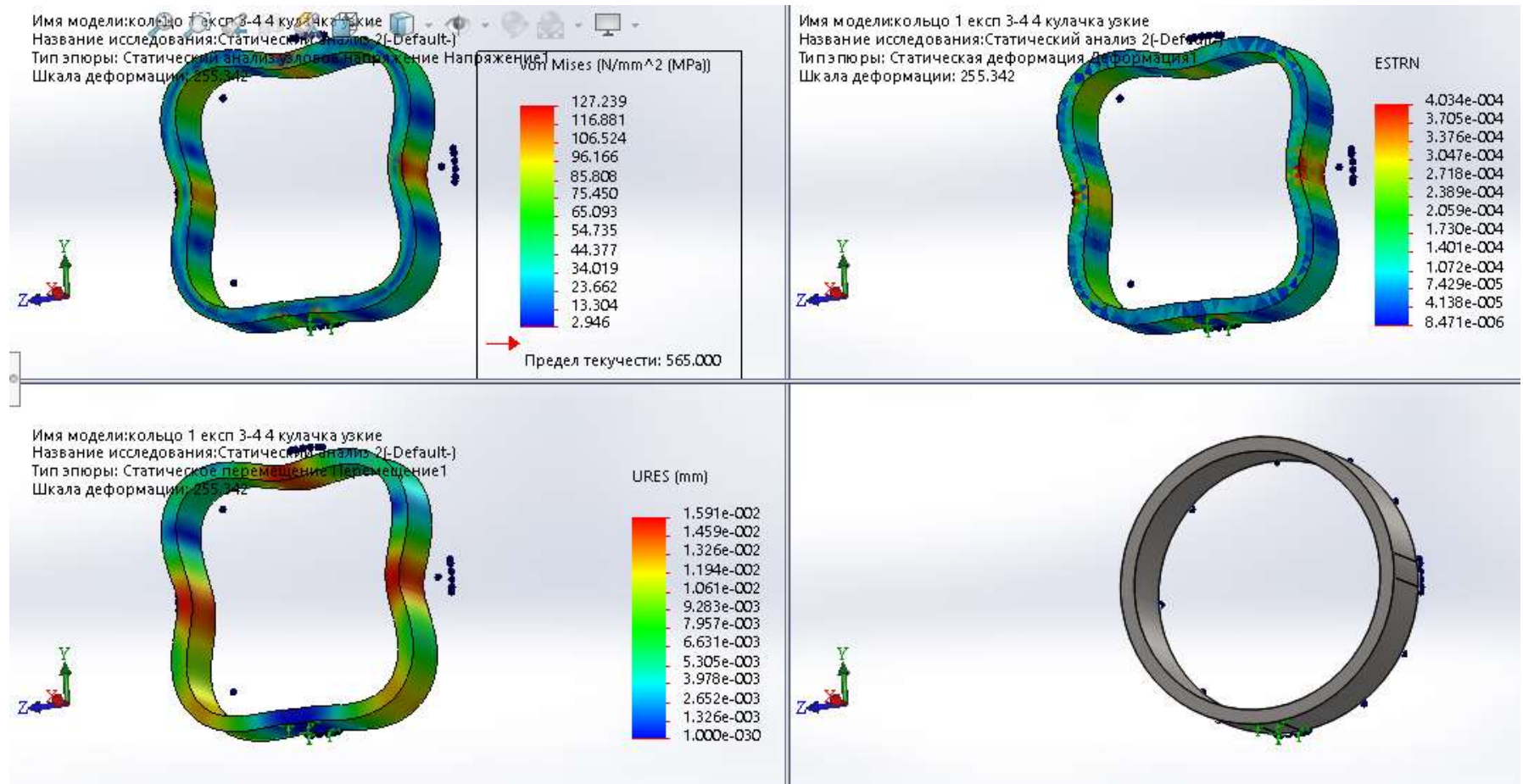


Рис. 35. Результати отримані при моделюванні за умов мінімальних режимів різання, затиску у чотирьох-кулачковому патроні із стандартною конфігурацією кулачків

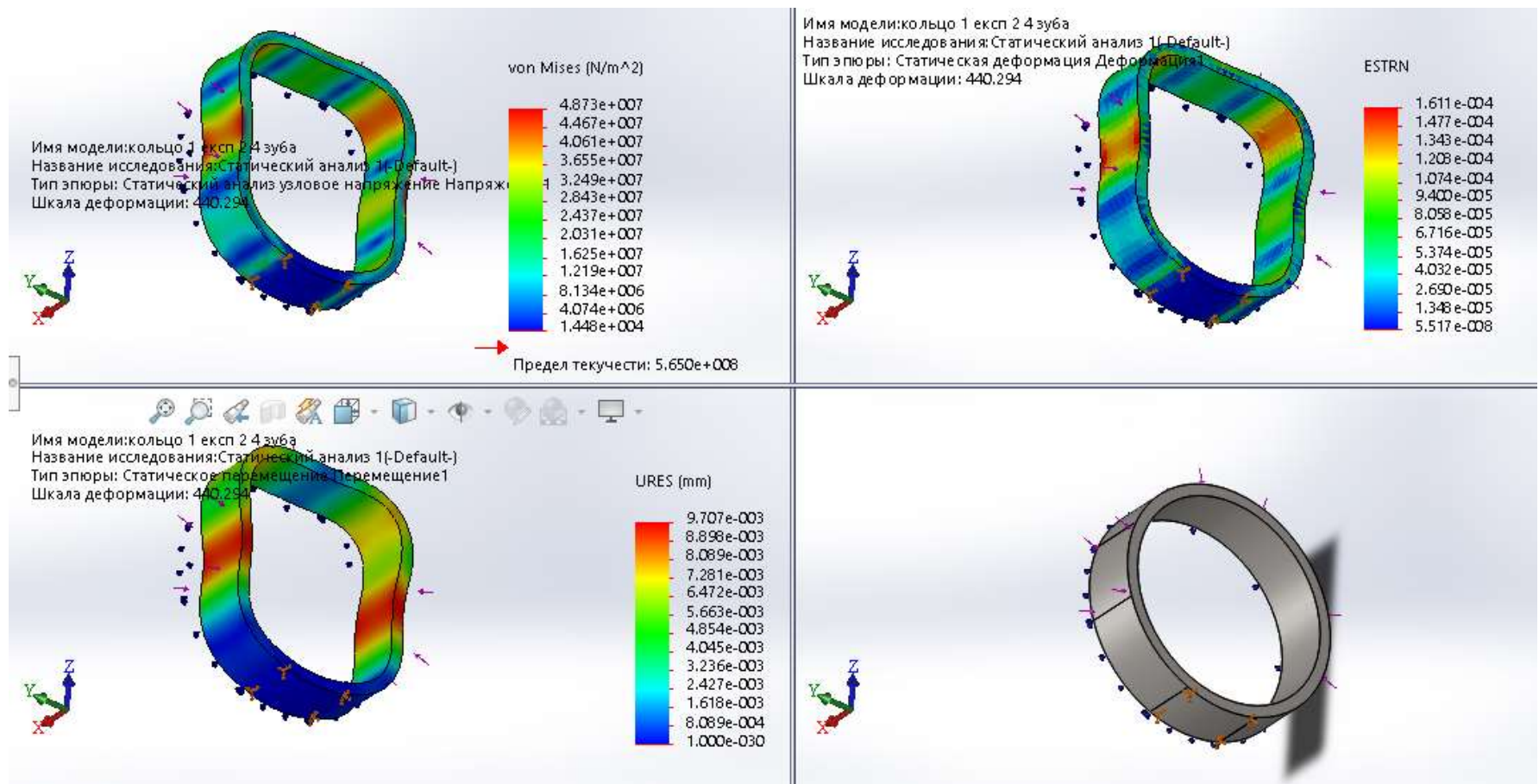


Рис. 36. Результати отримані при моделюванні за умов нормальних режимів різання, затиску у чотирьох-кулачковому патроні із «спеціальною» конфігурацією кулачків

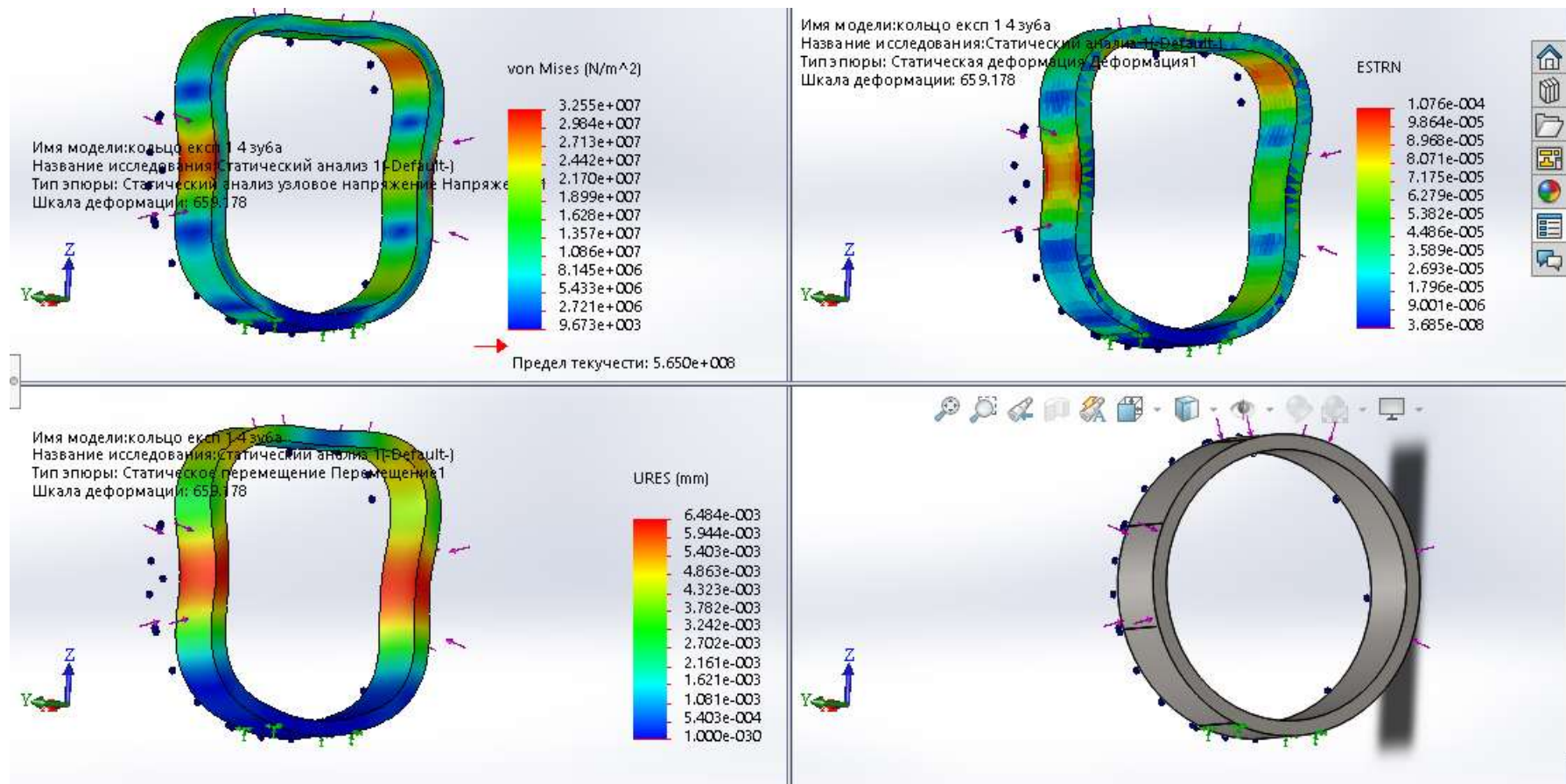


Рис. 37. Результати отримані при моделюванні за умов мінімальних режимів різання, затиску у чотирьох-кулачковому патроні із «спеціальною» конфігурацією кулачків

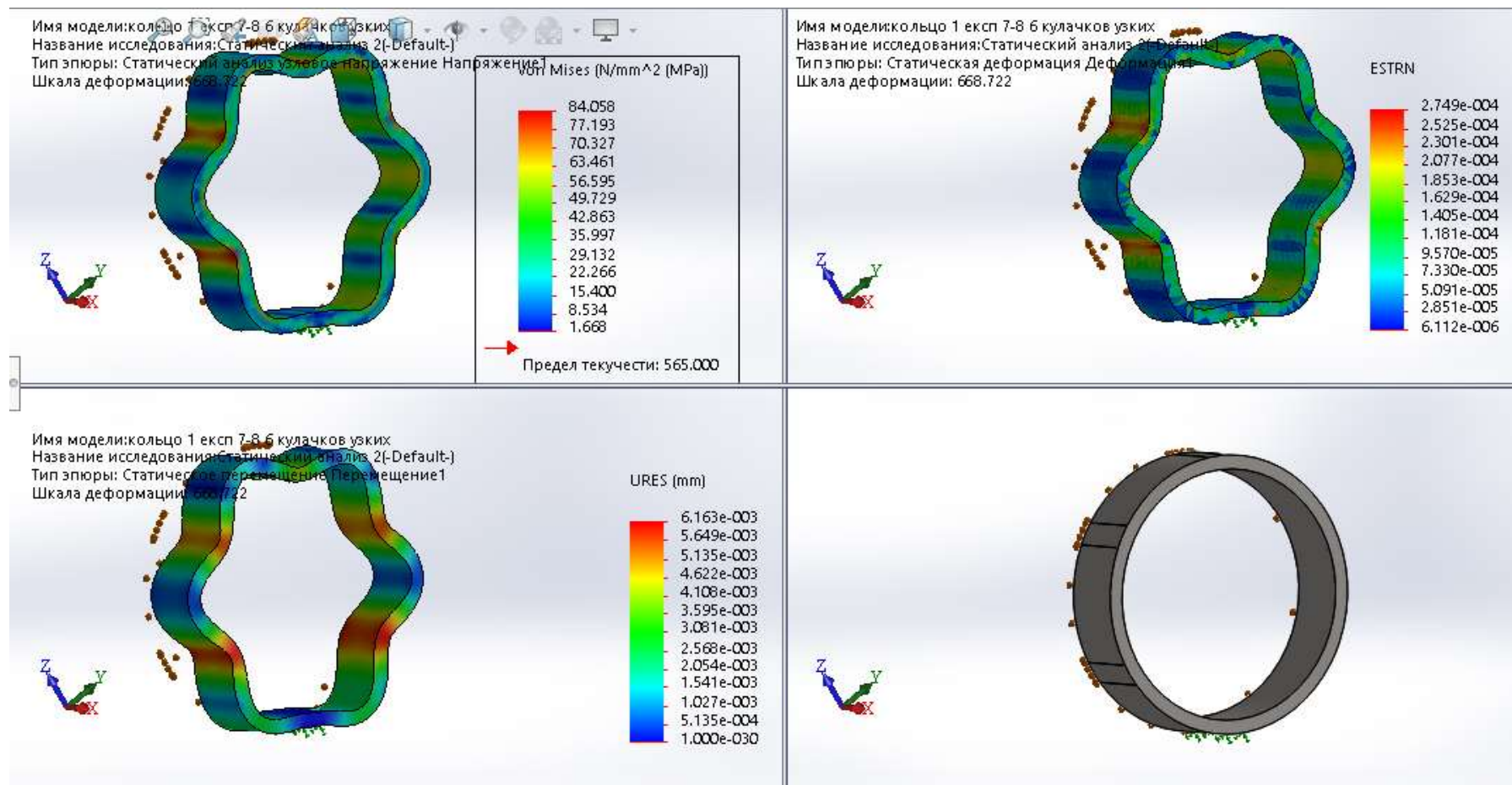


Рис. 38. Результати отримані при моделюванні за умов нормальних режимів різання, затиску у шести-кулачковому патроні із стандартною конфігурацією кулачків

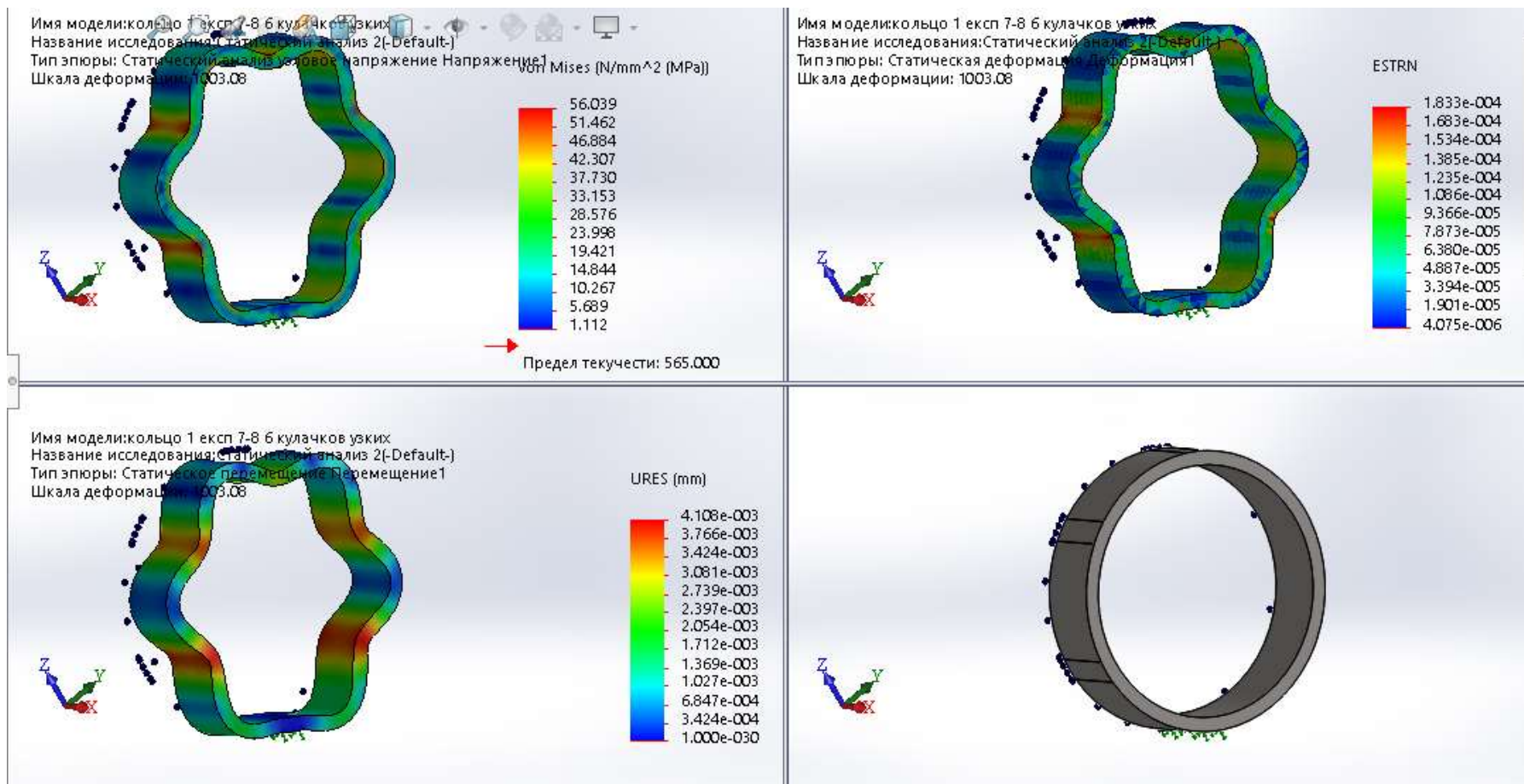


Рис. 39. Результати отримані при моделюванні за умов мінімальних режимів різання, затиску у шести-кулачковому патроні із стандартною конфігурацією кулачків

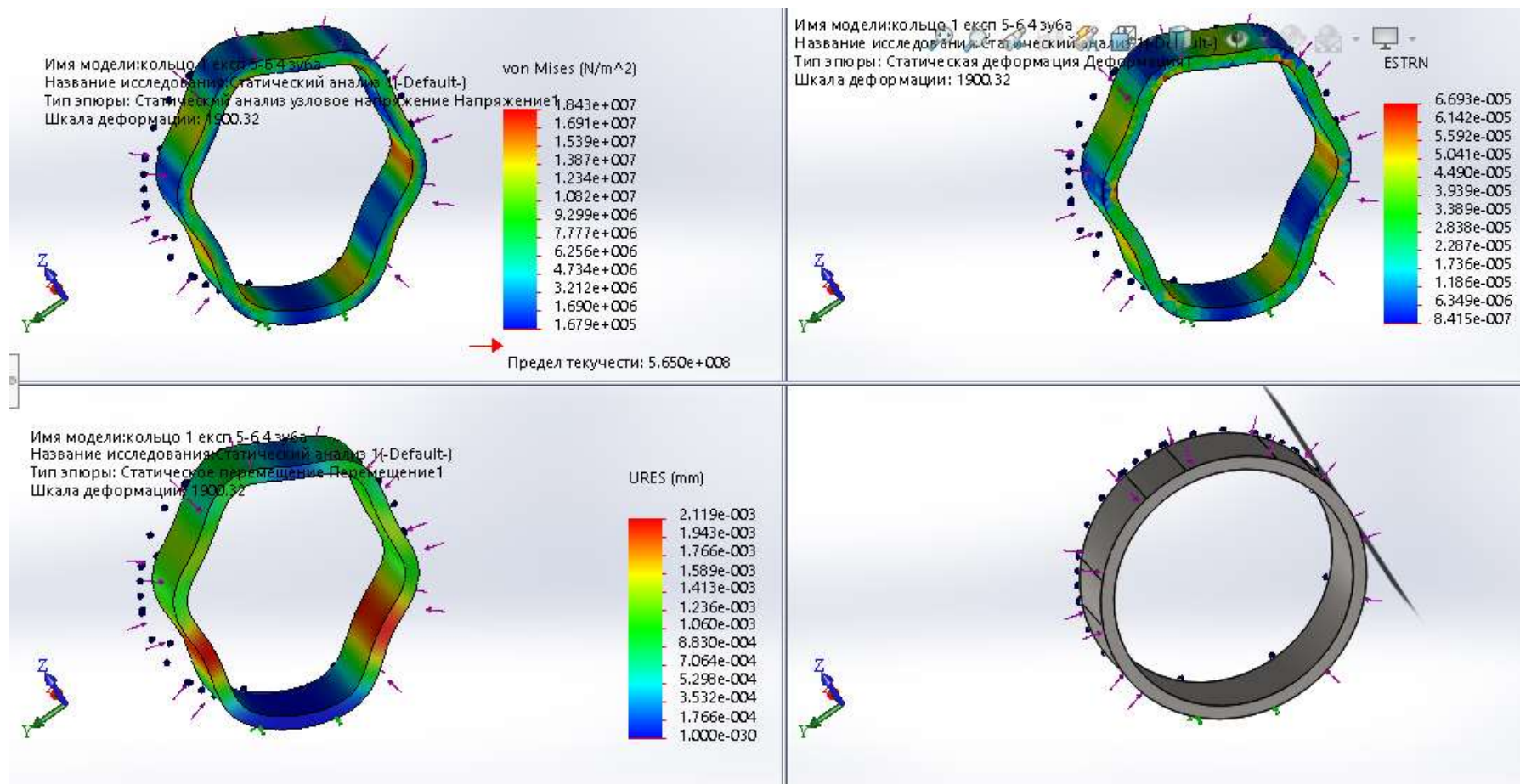


Рис. 40. Результати отримані при моделюванні за умов нормальних режимів різання, затиску у шести-кулачковому патроні із «спеціальною» конфігурацією кулачків

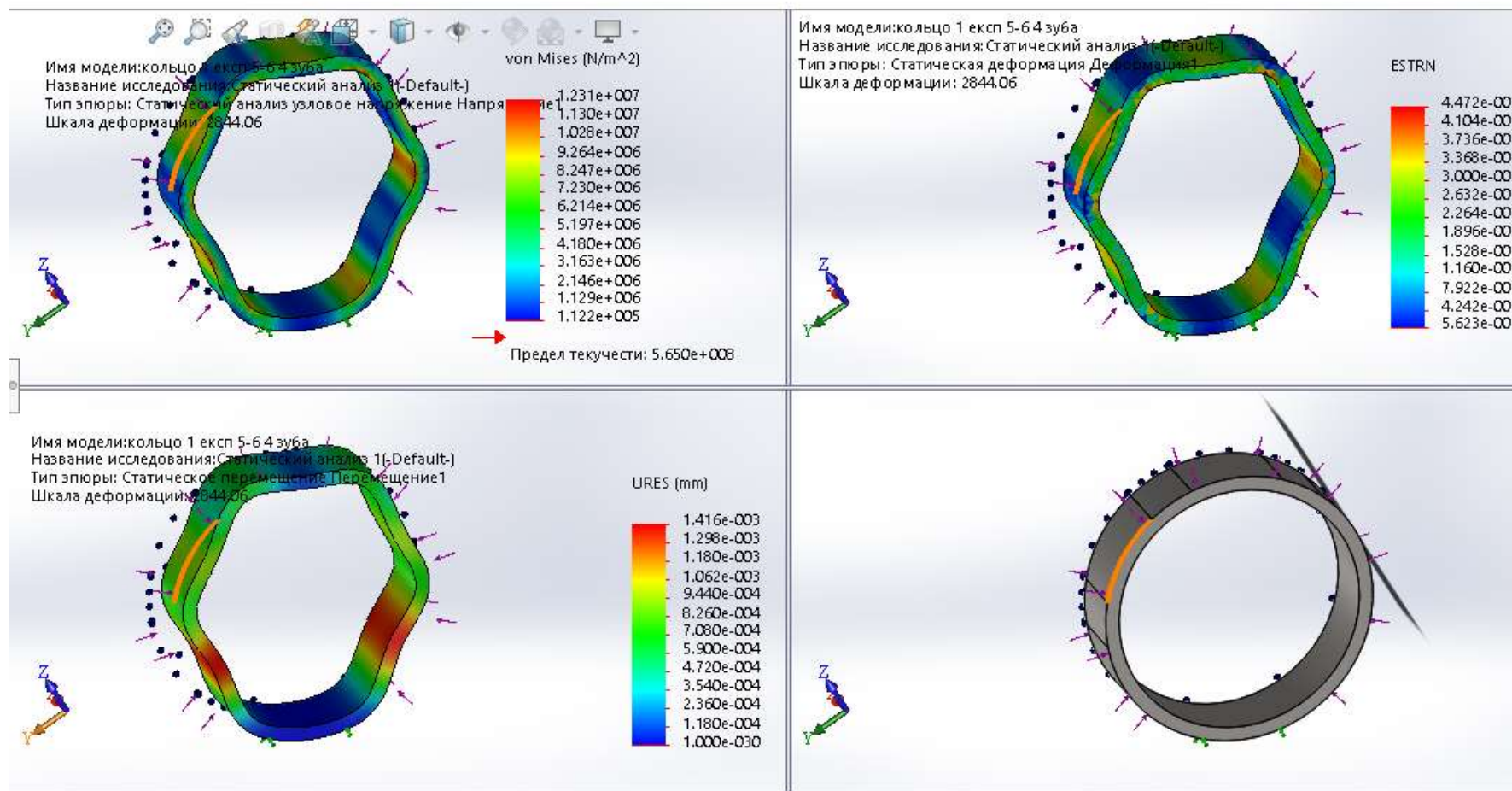


Рис. 41. Результати отримані при моделюванні за умов мінімальних режимів різання, затиску у шести- кулачковому патроні із «спеціальною» конфігурацією кулачків

Табл. 7. Результати отриманих при моделюванні даних

Деталь	Умови затиску	Сила затиску на кулачок (Н)	Максимальні напруження в деталі (N/m^2)· 10^6 МПа	Максимальне переміщення деталі (mm) · 10^{-3} мкм	Максимальна деформація деталі· 10^{-3}
Кільце 1	Норм. реж.; 3кул.; Станд.*	913,9	480	1,06	150
	Мін. реж.; 3кул.; Станд.	488,3	260	0,57	78
	Норм. реж.; 4кул.; Станд.	685,4	190	0,24	60
	Мін. реж.; 4кул.; Станд.	366,2	130	0,16	40
	Норм. реж.; 4кул.; Спец.**	274,2	48	0,097	16
	Мін. реж.; 4кул.; Спец.	146,5	33	0,065	11
	Норм. реж.; 6кул.; Станд.	365,6	84	0,062	27
	Мін. реж.; 6кул.; Станд.	195,3	56	0,041	18
	Норм. реж.; 6кул.; Спец.	146,2	18	0,021	6,7
	Мін. реж.; 6кул.; Спец.	78,1	12	0,014	4,5
Кільце 2	Норм. реж.; 3кул.; Станд.	930,5	489	1,08	153
	Мін. реж.; 3кул.; Станд.	495,1	264	0,58	79
	Норм. реж.; 4кул.; Станд.	697,9	194	0,24	61
	Мін. реж.; 4кул.; Станд.	371,3	132	0,16	41
	Норм. реж.; 4кул.; Спец.	279,2	49	0,1	16
	Мін. реж.; 4кул.; Спец.	148,5	34	0,066	11
	Норм. реж.; 6кул.; Станд.	372,2	85	0,063	27
	Мін. реж.; 6кул.; Станд.	198,0	57	0,041	18
	Норм. реж.; 6кул.; Спец.	148,9	18	0,021	6,8
	Мін. реж.; 6кул.; Спец.	79,2	12	0,014	4,6
Кільце 3	Норм. реж.; 3кул.; Станд.	941,1	495	1,09	155
	Мін. реж.; 3кул.; Станд.	499,3	266	0,58	80

Норм. реж.; 4кул.; Станд.	705,9	196	0,24	62
Мін. реж.; 4кул.; Станд.	374,5	133	0,16	41
Норм. реж.; 4кул.; Спец.	282,4	40	0,10	16
Мін. реж.; 4кул.; Спец.	149,8	34	0,07	11
Норм. реж.; 6кул.; Станд.	376,5	86	0,06	27
Мін. реж.; 6кул.; Станд.	199,7	57	0,04	18
Норм. реж.; 6кул.; Спец.	150,6	18	0,02	7
Мін. реж.; 6кул.; Спец.	79,9	12	0,01	5

*Станд. – Кулачок токарний стандартної геометрії, Рис. 42

** Спец. – Кулачок токарний спеціальної геометрії розроблений для точіння тонкостінних деталей, Рис. 43

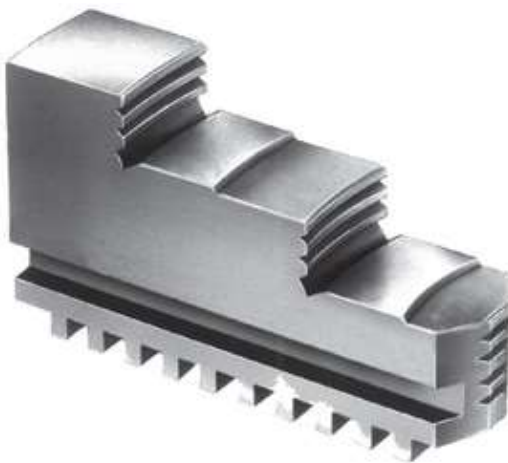


Рис. 42. Токарний кулачок стандартної геометрії



Рис. 43. Токарні кулачки спеціальної геометрії

При математичному аналізі було розраховано різні сили затиску тонкостінних деталей типу кілець для різних типів токарних патронів та конфігурацій кулачків. За даними результатами було зроблено ряд висновків.

1. При збільшенні точок затиску деталі в токарному патроні, а саме, 3, 4 та 6-ть кулачків, зменшуються зовнішні деформації деталі, оскільки сила затиску розподіляється більш рівномірно.

2. При збільшені контактних площ при затиску деталі в системі деталь-кулачок спостерігається зменшення зовнішніх деформацій деталі,

оскільки збільшення площі контакту змінює коефіцієнт тертя в системі, що дозволяє зменшити силу затиску деталі.

3. Було виявлено, що при збільшенні площі контакту кулачків до деталі товщина стінки деталі не суттєво впливає на процес обробки деталі в цілому.

4. Комбінування різної геометрії кулачків, режимів різання та геометрії інструменту дозволяє збільшити якість та точність отриманих розмірів при обробленні тонкостінних кілець в процесі токарної токарної обробки.

5. Було виявлено, що деформації та переміщення не мають значної залежності від зовнішнього діаметру оброблюваної деталі. При аналізі трьох типорозмірів кілець вплив діаметру деталі на результати обробки були незначними і не перевищували 3% від попереднього розміру.

6. Найбільший вплив на процес обробки мають саме сили затиску, які напряму залежать від режимів різання та геометрія затискного пристрою (в данному випадку кулачка токарного патрону)

3.2 Практична частин експерименту на токарному верстаті

Практична частина експерименту проводилась на токарному верстаті 16K20. Дослідження проводяться для тонкостінних кілець із товщиною стінки 2мм та діапазоном зовнішніх діаметрів Ø30-80мм. Після оброблення деталей проводились виміри деформацій кільця в різних точках з дискретним поворотом в 15°.

Ескізи вихідних деталей зображені на Рис. 44.

Досліджувані деталі були попередньо оброблені. Зовнішній діаметр, як технологічна база була проточена до розміру за квалітетом h7, а внутрішній діаметр був оброблений до напівчистої поверхні задля мінімального розміру стінки кільця. Така попередня обробка була обумовлена тим, що максимальні деформації при стабільній для всього процесу силі затиску буду відбуватись під час чистового оброблення, оскільки основна маса припуску уже знята, а сила затиску розраховувалась для чорнової обробки (максимальних режимів різання).

У результаті експерименту планується отримати таблицю із максимальними результуючими відхиленнями від круглості, які будуть розраховані прикладним шляхом, за допомогою комплексу вимірювальної оснастки: набору мікрометрів та нутромірів. Значення практичної частини експерименту будуть порівнюватись із значеннями отриманими в процесі моделювання в віртуальному середовищі та, по результатах порівняння, будуть дані висновки та рекомендації, щодо покращення процесу обробки тонкостінних кілець у токарних патронах різних типів та з кулачками різних компонок, а також рекомендації щодо вибору необхідних для коректної обробки деталей режимів різання.

Результати експерименту на токарному верстаті 16K20 показані в Табл. 8-10., як уже було зазначено вище виміри наведені для деталей з дискретним поворотом у 15° . Деформації вимірювали, як для зовнішніх так і для внутрішніх поверхонь, окрім цього вимірювали товщину стінки. Оскільки основні переміщення були збурені силами різання і силами затиску, відповідно, тиском, які вони створювали, можемо спостерігати змінення значень деформації, як у від'ємну так і у додатну сторону.

Оброблення проводилось у два переходи. На першій операції за допомогою задньої бабки і додаткової оснастки формувалась база (Рис.46.). Для кожного типорозміру деталі було створено свій унікальний набір оснастки, який складався із затискуваного в три-кулачковий патрон упору і циліндричної бабишки, яка підпиралась заднім центром.



Рис. 46. Операція оброблення
зовнішньої поверхні



Рис. 47. Операція розточування

Після формування бази переходили до операції розточування (Рис. 47.), яка складалась із чорного та чистового переходу. Сила зажиму на динамометричному ключі складала 50 Nm (Рис. 48.) і не змінювалась з залежності від переходу. На чорновій операції знімалась значна частина припуску, що дозволяло уникнути напівчистового переходу. Режими різання були незмінні для всіх оброблюваних деталей. На чистовій операції глибина різання h не перевищувала 0,25мм на сторону, що дозволяло досягти високої точності на внутрішній поверхні обробленої деталі. Для підвищення якості отриманої деталі була проведена операція зйому фасок (Рис.49.).



Рис. 48. Процес зажиму деталі



Рис. 49. Процес зняття фасок



Рис. 50-51. Деформація оброблюваної деталі під впливом діючих на неї сил

Після обробки на деталях і без додаткової вимірювальної оснастки бачимо некруглість обробленої поверхні. Така деформація спричинена силами зажиму та різання (Рис. 50-51.), що деформують контур кільця у відповідні до прикладення сил сторони. Результати різання показані у відповідних таблицях.

Табл. 8. Вимірний номінал розміру зовнішнього діаметру після обробки на верстаті 16K20, мм

Кут виміру деталі, °	Зовнішній діаметр кільця									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	70	55,75	72,65	70,06	57,85	56,31	47,91	47,35	32,27	32,27
30	70,15	55,75	72,67	70,02	57,88	56,26	47,9	47,36	32,3	32,3
45	70,26	55,78	72,69	69,98	57,81	56,33	47,92	47,35	32,33	32,34
60	70,3	55,78	72,67	69,98	57,75	56,3	47,9	47,32	32,35	32,36
75	70,18	55,78	72,65	69,95	57,73	56,28	47,87	47,36	32,37	32,38
90	69,86	55,8	72,61	69,92	57,77	56,28	47,84	47,4	32,39	32,38
105	69,86	55,81	72,65	69,95	57,84	56,31	47,81	47,37	32,36	32,39
120	69,93	55,79	72,59	70,04	57,84	56,3	47,82	47,32	32,34	32,35
135	69,84	55,78	72,6	70,07	57,85	56,26	47,83	47,33	32,32	32,3
150	69,88	55,75	72,61	70,06	57,92	56,29	47,83	47,34	32,3	32,38
165	69,95	55,78	72,6	70,05	57,92	56,29	47,84	47,37	32,29	32,26
180	69,98	55,8	72,65	70,09	57,9	56,25	47,88	47,31	32,28	32,25

Табл. 9. Вимірний номінал розміру внутрішнього діаметру після обробки на верстаті 16K20, мм

Кут виміру деталі, °	Внутрішній діаметр кільця									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	65,8	52,85	68,06	59,94	53,94	51,62	42,41	43,51	28,2	23,32
30	66,1 5	52,87	67,96	59,92	53,92	51,58	42,47	43,49	28,17	23,3
45	66,0 5	50,89	67,87	60,05	53,89	51,56	42,54	43,51	28,15	23,29
60	66,1 8	50,95	67,88	59,96	53,9	51,55	42,51	43,42	28,23	23,26
75	66,0 8	50,99	67,86	59,98	53,9	51,53	42,49	43,34	28,31	23,29
90	66,1 5	50,96	67,88	60,01	53,92	51,55	42,49	43,37	28,29	23,25
105	66,1 1	50,94	67,96	60,08	53,93	51,53	42,48	43,45	28,28	23,19

120	66,9	50,93	67,99	60,02	53,96	51,58	42,46	43,44	28,21	23,23
135	66,4 5	50,89	68,05	59,98	53,97	51,55	42,49	43,43	28,13	23,25
150	66,4 3	50,89	68,04	60,01	54	51,52	42,5	43,43	28,18	23,27
165	66,4	50,87	68,04	60,02	54,01	51,54	42,49	43,45	28,22	23,29
180	66,3 5	52,83	68,02	60,05	53,94	51,59	42,45	43,49	28,21	23,3

Табл. 10. Вимірний номінал товщини стінки після обробки на верстаті 16K20, мм

Кут виміру деталі, °	Товщина стінки кільця									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	1,92	1,87	2,05	2,25	2,2	1,96	2,6	2,12	2,02	2,0 5
30	1,94	1,75	2,3	2,04	2,14	1,87	2,45	1,96	2,04	2,0 6
45	1,64	1,89	2,42	1,84	2,02	1,72	2,35	1,81	2,06	2,0 2
60	2,02	2,02	2,43	2,01	1,85	1,58	2,25	1,67	2,09	1,9 9
75	1,62	2,07	2,27	2,27	1,79	1,67	2,33	1,79	2,07	1,9 4
90	1,78	2,08	2,07	2,47	1,87	1,86	2,42	1,98	2,04	1,9 5
105	2,07	2	1,87	2,03	1,99	2,01	2,45	2,12	1,99	2
120	1,92	1,83	1,83	2,47	2,08	2,13	2,43	2,23	1,95	2,0 5
135	1,9	1,7	1,93	2,23	2,12	2,14	2,42	2,15	1,93	2,0 7
150	1,92	1,73	2,08	1,97	2,14	2	2,33	2,02	1,94	2,0 4
165	1,92	1,95	2,23	1,89	1,94	1,83	2,26	1,82	1,92	2
180	1,79	2,08	2,26	2,15	1,78	1,67	2,23	1,64	1,93	1,9 3
195	1,62	2,07	2,37	2,4	1,73	1,76	2,35	1,74	1,92	1,8 9
210	1,6	2,08	2,15	2,65	1,83	1,84	2,43	1,9	1,92	1,9 2
225	1,85	1,97	1,92	2,67	1,95	1,97	2,56	2,05	1,92	1,9 9
240	1,94	1,85	1,84	2,57	2,06	2,09	2,61	2,12	1,93	2,0 7
255	1,92	1,73	1,94	2,25	2,08	2,06	2,57	2,06	1,97	2,1 1
270	1,91	1,78	2,05	2,01	2,05	1,98	2,43	1,93	2,01	2,1

										2
285	1,91	1,94	2,25	1,87	1,95	1,78	2,32	1,74	2,06	2,0 6
300	1,78	2,05	2,32	2,07	1,85	1,57	2,28	1,63	2,09	1,9 9
315	1,55	2,07	2,02	2,45	1,8	1,6	2,36	1,73	2,11	1,9 2
330	1,58	2,08	1,89	2,67	1,94	1,74	2,49	1,92	2,08	1,9
345	1,88	2,01	1,82	2,7	2,07	1,89	2,57	2,09	2,07	1,9 7
360	1,9	1,97	1,9	2,55	2,15	1,96	2,65	2,19	2,03	2,0 1

Для точних розрахунків було використане спеціальне вимірювальне коло, за допомогою якого можна контролювати кут повороту (Рис. 52.). Зовнішній діаметр обробленої деталі вимірювали за допомогою мікрометра з точністю в 0,002мм (Рис. 53.) і кроком повороту в 15°. Внутрішній діаметр вимірювали нутромір з двома рухомими пінами, які жорстко фіксуються гвинтом (Рис. 54.). Після фіксації результати виміру знімаєм за допомогою уже описаного вище мікрометра (Рис. 55.). Товщину стінки заміряли трубним мікрометром, який має спеціальну геометрію для зручного використання (Рис. 56.).

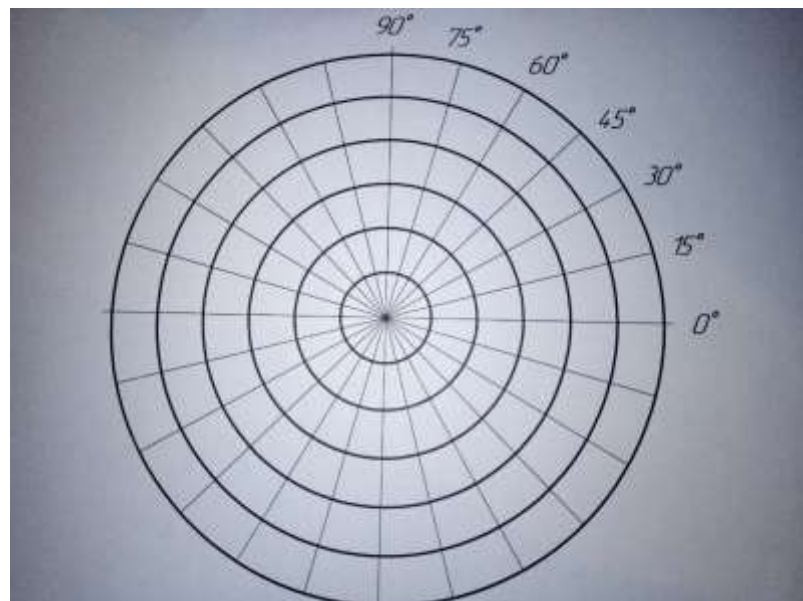


Рис. 52. Вимірювальне коло

Процес виміру зовнішніх діаметрів показаний на Рис.53.



Рис. 53. Процес виміру зовнішніх діаметрів
Процес виміру внутрішніх діаметрів показаний на Рис. 54-55.



Рис. 54. Перший етап виміру внутрішнього діаметру



Рис. 55. Другий етап виміру внутрішніх діаметрів

Процес виміру товщини стінки показаний на Рис. 56.

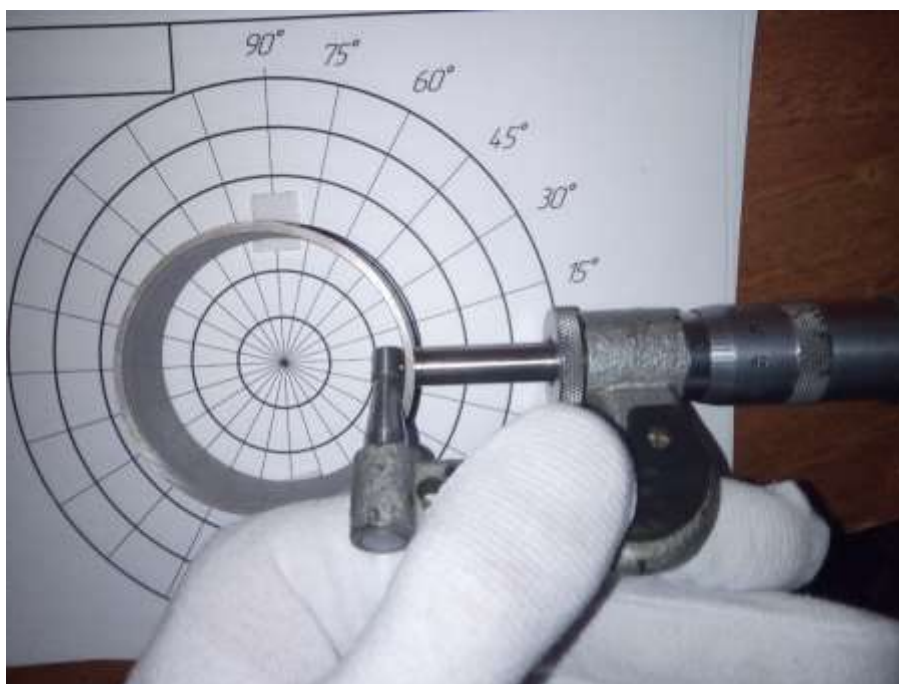


Рис. 56. Процес виміру товщини стінки

В ході проведення експерименту виникали такі проблеми:

- Недостатня сила різання не забезпечувала якісного зажиму заготовки, що призводило до провороту деталі в кулачках (Рис.57.). Така ситуація нівелюється збільшенням площі контакту, або сили затиску. Але надмірне збільшення сили затиску призведе, до збільшення деформацій, що

призводить до незабезпечення допусків до отриманої деталі. Збільшення площі затиску ж дозволяє, при прикладенні ідентичних зусиль, не деформувати деталь більше допущеної допусками величини.

- При зажимі відносно-м'яких деталей і тонкою стінкою (в нашому випадку кільце із нержавійки), можемо бачити, що сила зажиму деформувала деталь настільки, що оброблювались лише деформовані силою затиску сектори кільця (Рис.58.). Спроба обробити внутрішню поверхню деталі цілком призвела до значного зниження товщини стінки кільця в деформованих ділянках.



Рис. 57. Результати провороту
деталі в кулачках



Рис. 58. Деформація стінок
деталі

В результаті проведеного експерименту, можна зробити висновки, що деформації кільця можна контролювати за допомогою зміни режимів різання. Наприклад, при зменшенні глибини різання результуюча сила різання знижується відповідно, що зменшує деформації деталі у напрямку прикладених сил різання, а також дозволяє зменшити сили затиску, що також вплине на величину деформації. Також, стає зрозуміло, що зі збільшення кількості фіксуючих поверхонь, сила затиску за рахунок розділу на більшу

кількість площин зменшує номінальну величину відхилення, що дозволяє стверджувати, що номінал деформацій зменшується. Окрім цього збільшення площі самих затискних елементів призводить до точкового зменшення прикладених сил, що також зменшить величину деформації оброблюваного кільця.

Результати вимірювань можна проілюструвати за допомогою графіків, що ілюструють екстремуми відхилень зовнішнього та внутрішнього діаметрів деталі від середньої лінії та товщини стінки в порівнянні з запланованою товщиною у 2мм.

Результати показані на Рис. 59-67.

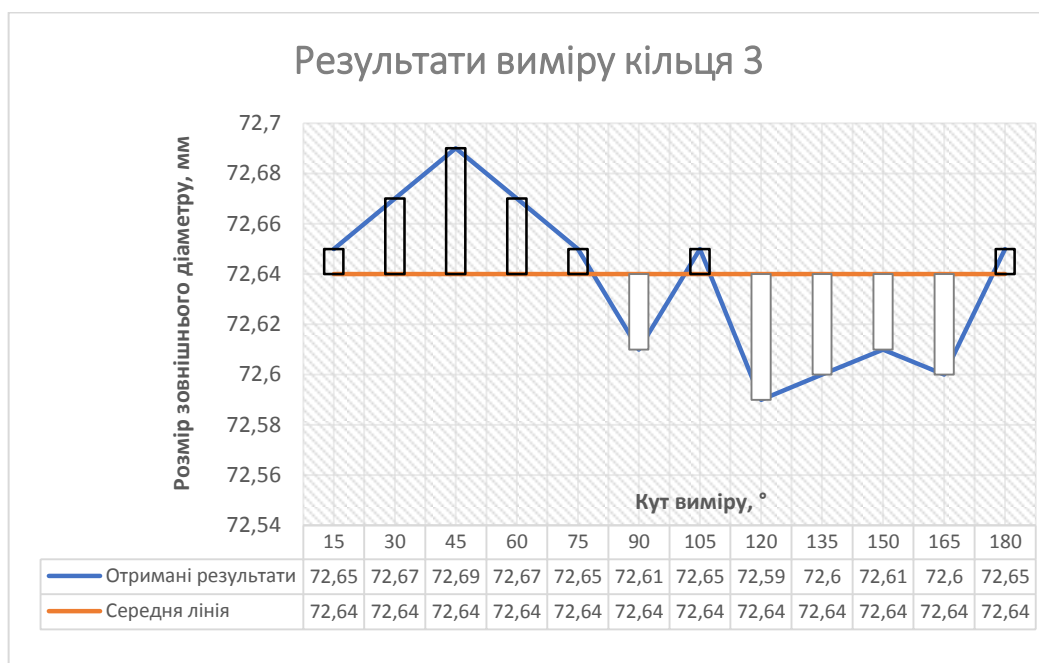


Рис. 59. Графік вимірів зовнішнього діаметру Кільця 3

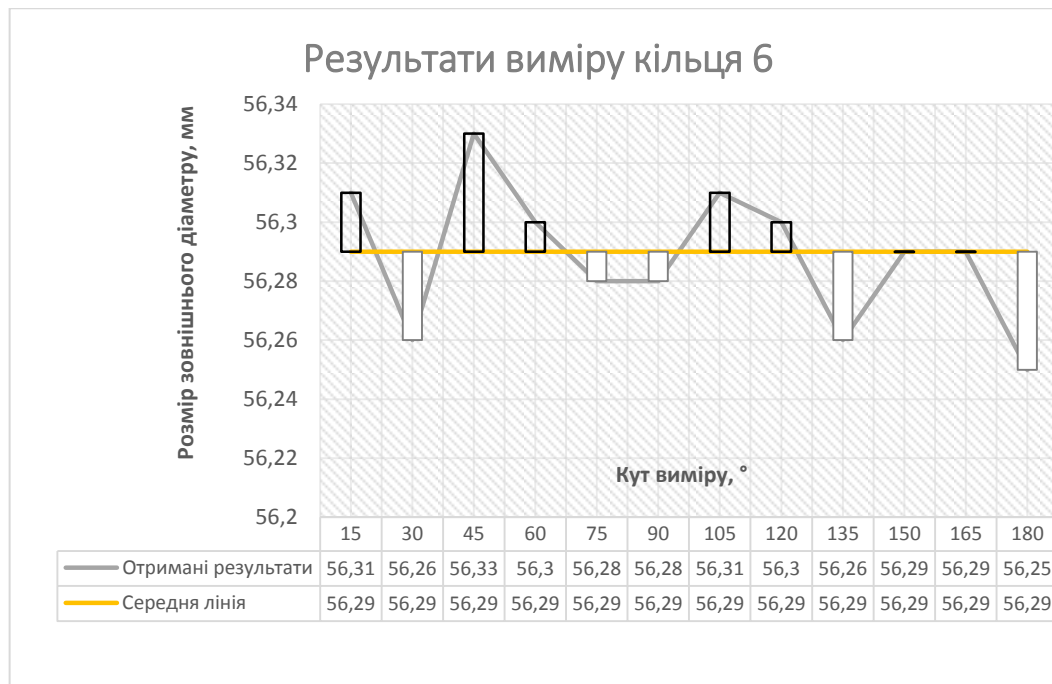


Рис. 60. Графік вимірів зовнішнього діаметру Кільця 6

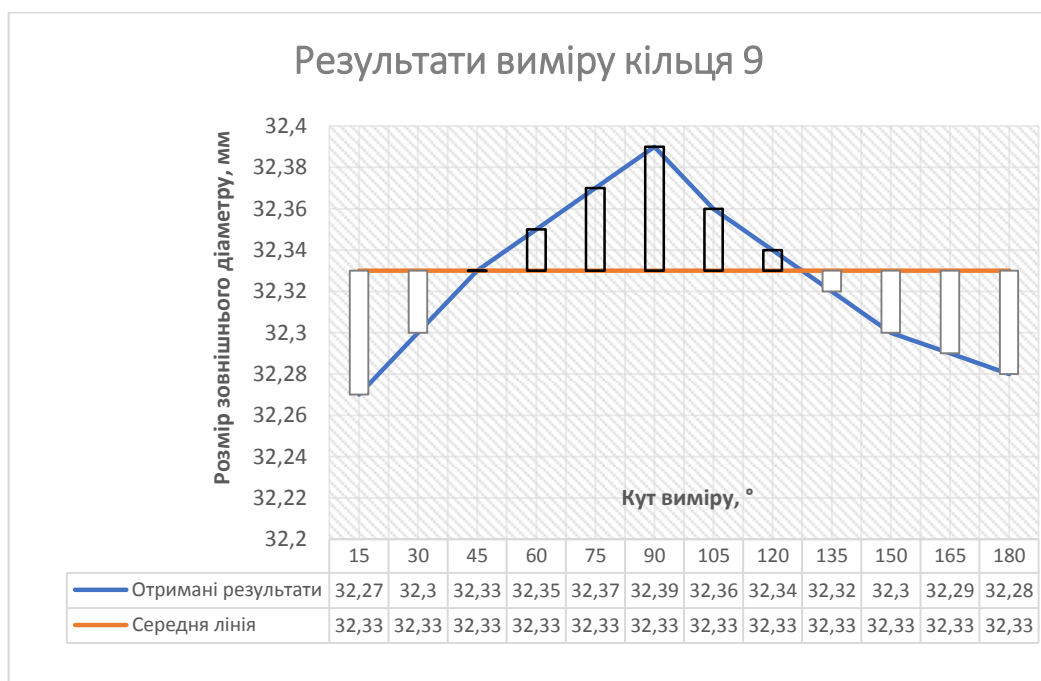


Рис. 61. Графік вимірів зовнішнього діаметру Кільця 9

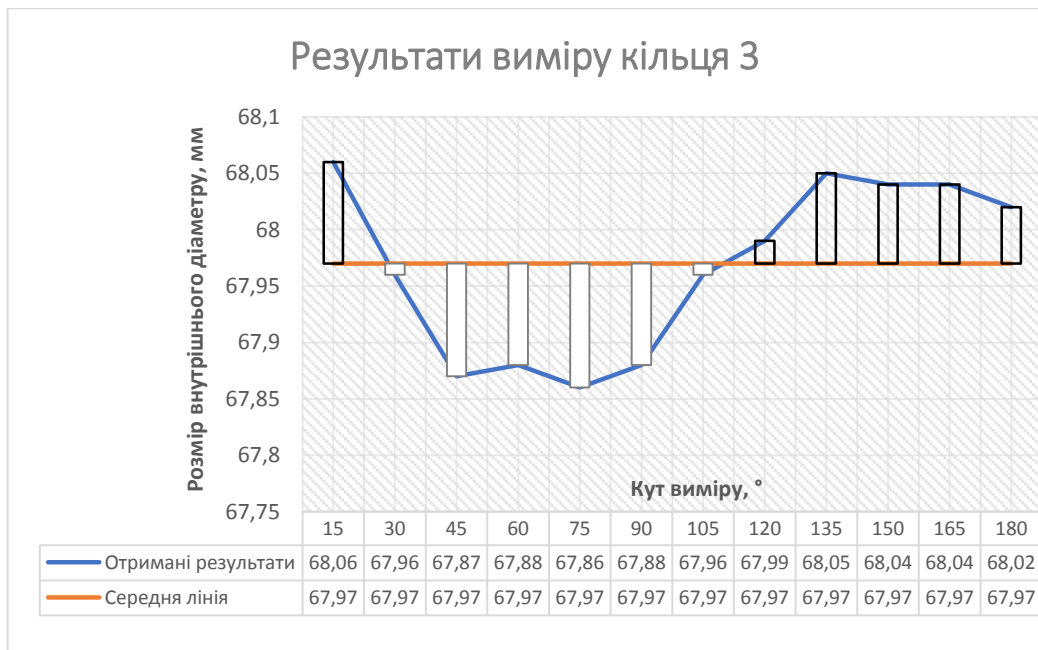


Рис. 62. Графік вимірів внутрішнього діаметру Кільця 3

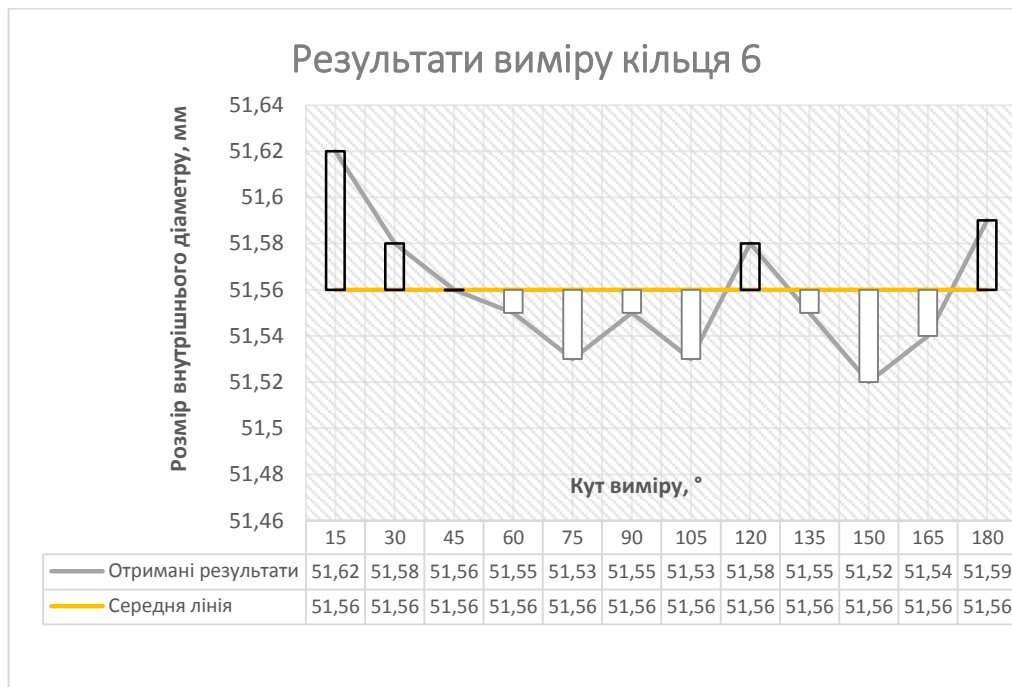


Рис. 63. Графік вимірів внутрішнього діаметру Кільця 6



Рис. 66. Діаграма вимірів товщини стінки Кільця 6



Рис. 67. Діаграма вимірів товщини стінки Кільця 9

З даних графіків можна зробити такі висновки:

- При заданій середній лінії зовнішнього діаметру кільця «3» $D_{\text{сер.3}} = 72,64\text{мм}$, максимальне відхилення в бік збільшення діаметру складає $\delta_{D_{\text{max3}}} = 0,05\text{мм}$, що відповідає розміру $D_{\text{max3}} = 72,69\text{мм}$, відхилення в бік зменшення складає $\delta_{D_{\text{min3}}} = 0,05\text{мм}$, що відповідає розміру $D_{\text{min3}} = 72,59\text{мм}$. Для кільця «6» та «9» відповідні значення складають $D_{\text{сер.6}} = 56,29\text{мм}$, $\delta_{D_{\text{max6}}} =$

0,04мм, $D_{\max 6} = 56,33\text{мм}$, $\delta_{D_{\min 6}} = 0,04\text{мм}$, $D_{\min 6} = 56,25\text{мм}$; $D_{\text{сер.}9} = 32,33\text{мм}$, $\delta_{D_{\max 9}} = 0,06\text{мм}$, $D_{\max 9} = 32,99\text{мм}$, $\delta_{D_{\min 9}} = 0,06\text{мм}$, $D_{\min 9} = 32,27\text{мм}$.

- При заданій середній лінії внутрішнього діаметру кільця «3» $d_{\text{сер.}3} = 67,97\text{мм}$, максимальне відхилення в бік збільшення діаметру складає $\delta_{d_{\max 3}} = 0,09\text{мм}$, що відповідає розміру $d_{\max 3} = 68,06\text{мм}$, відхилення в бік зменшення складає $\delta_{d_{\min 3}} = 0,11\text{мм}$, що відповідає розміру $d_{\min 3} = 67,88\text{мм}$. Для кільця «6» та «9» відповідні значення складають $d_{\text{сер.}6} = 51,56\text{мм}$, $\delta_{d_{\max 6}} = 0,06\text{мм}$, $d_{\max 6} = 51,62\text{мм}$, $\delta_{d_{\min 6}} = 0,04\text{мм}$, $d_{\min 6} = 51,58\text{мм}$; $d_{\text{сер.}9} = 28,23\text{мм}$, $\delta_{d_{\max 9}} = 0,08\text{мм}$, $d_{\max 9} = 28,31\text{мм}$, $\delta_{d_{\min 9}} = 0,10\text{мм}$, $d_{\min 9} = 28,13\text{мм}$.

- Діаграми зміни товщини стінки гарно ілюструють вплив сил затиску на результати обробки. Добре помітно, що зменшення товщині стінки відбувається з систематикою, раз на 120° , що обумовлено затиском деталі в трьохкулачковому патроні, крок кулачків якого складає 120° . Такі результати показують, що результатом обробки стану некруглість поверхні.

- Можна зробити висновки про те, що збільшення площі затиску деталі зменшить пікові точки деформацій і відповідні екстремуми зменшаться у своїх номінальних значення, а збільшення кількості фіксуючих елементів дозволить знизити силу, що прикладається одним елементом, для фіксації деталі.

Загальним результатом проведеного дослідження є графік, який порівнює результати отримані за допомогою моделювання та дослідним шляхом. На Рис. 68. Та Рис. 69. показані результати моделювання та точіння відповідно, а на Рис. 70. порівняльний графік отриманих результатів. Як бачимо різниця у отриманих даних не перевищує відхилень у $\delta_{\text{mm}} = \pm 0,015\text{мм}$, що дає результуюче відхилення у $\delta = 0,03\text{мм}$.

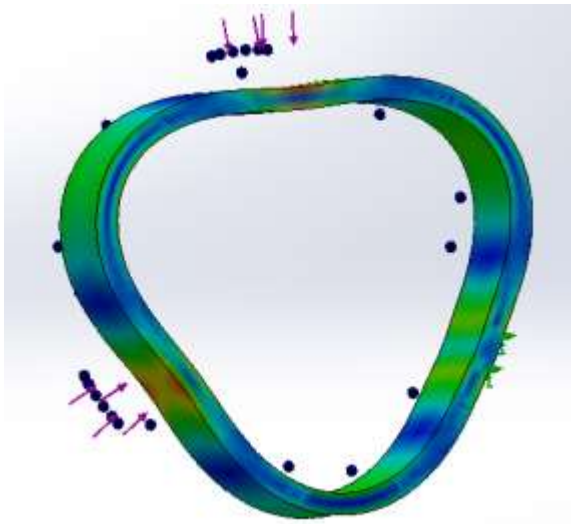


Рис. 68. Отриманні в процесі моделювання результати

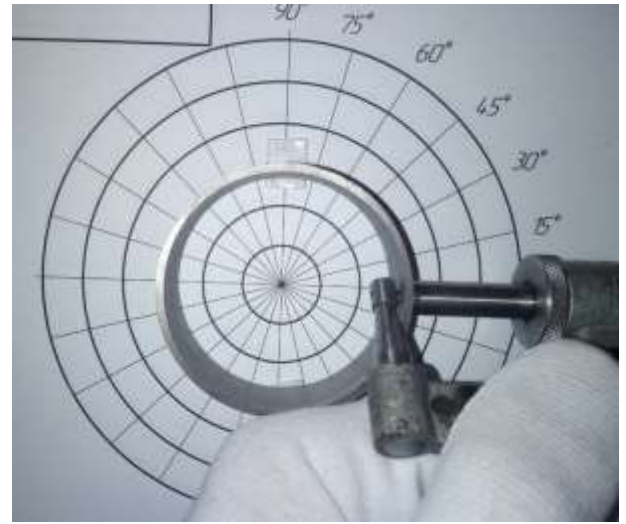


Рис. 69. Отримана після обробки деталь

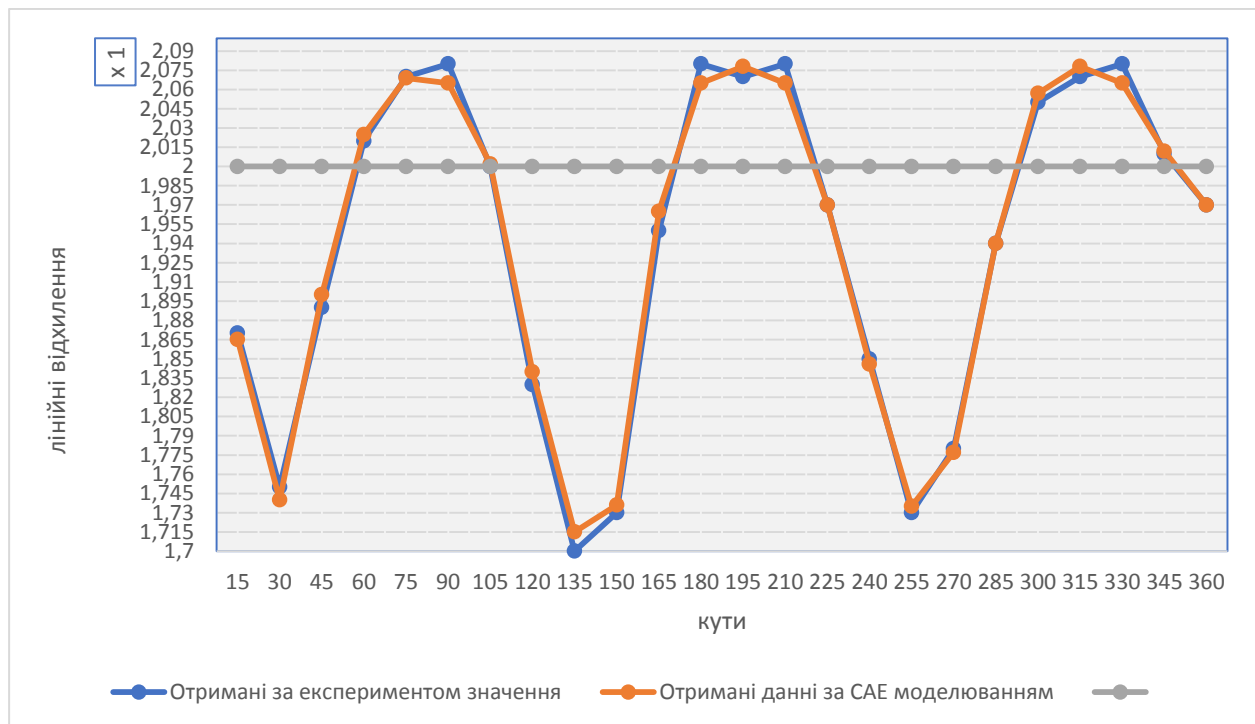


Рис. 70. порівняльний графік отриманих результатів

У зв'язку з усіма проведеними дослідями та всією отриманою інформацією можна стверджувати, що в САЕ системах можна досить точно та вдало прогнозувати отримані на кільці деформації, що, в свою чергу, дозволить зменшити виробничі витрати на розробку технологічного процесу. Отримані показники точності показують, що при проектуванні за допомогою програмного середовища реальні втрати по точності не перевищують 0,03мм,

що для прикладу на Ø50мм відповідає 7-му квалітету точності, і не все ЧПУ обладнання здатне взагалі досягти такого результату.

4. СТАРТАП

4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

4.1.1. Опис ідеї стартапу (табл. 11.)

Табл. 11. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Спрощення процесу обробки тонкостінних кілець без втрат у точності	1. Авіаційна галузь 2. Автомобілебудування 3. Приладобудування 4. Аграрна техніка і т.д.	1. Надані рекомендації дозволять спроектувати ТП, який задовільнить якість виробу без обов'язкових додаткових витрат
		2. Можливість розрахувати необхідні для виконання технічного завдання до моменту самого оброблення
		3. Зниження витрат на невдалі експериментальні спроби
		4. Зменшення ризиків при обробленні деталей «всліпу»

Метод описаний в роботі не є новим, але був доповнений і змінений з урахуванням технологічних особливостей заданого завдання.

4.1.2 Визначення позиції на ринку (табл. 12.)

Таблиця 12. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенцій) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Електро-магнітний патрон	Технологічне армування	Розрізна втулка			
1	Впровадження	+	-	-	+	-	-	+
2	Універсальність	+/-	-	+	+/-	-	+	-
3	Вартість	+	-	+/-	+	-	-	+
4	Результативність	+	+/-	+/-	+/-	-	-	+
5	Простота у використанні	+/-	+	-	+	-	+	-
6	Продуктивність	+/-	+	-	+/-	-	+	-

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту (табл. 13.)

Табл. 13. Технологічний аудит проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Зниження сили затиску та сили різання за рахунок зниження режимів.	Не потребує особливих технологій. Обираємо аналог з іншими рекомендаціями.	Ринок заповнений пропозиціями по різному інструменту.	Технологія повністю доступна, є велика кількість варіантів
2	Зниження зусиль на деталь за рахунок збільшення кількості зажимних елементів	Досягається заміною одного токарного патрону на інший.	Ринок заповнений пропозиціями по різній оснастці.	Технологія повністю доступна, є велика кількість варіантів
3	Зниження зусиль на деталь за рахунок збільшення контактних площ зажимних елементів	Досягається розробкою спеціальної конструкції кулачків з покупних заготовок.	Для реалізації необхідні розхідні матеріали, які постійно постійно поповнюються на виробництві	Технологія повністю доступна
4	Спеціальна оснастка	Закупівля спеціальної оснастки спеціально розробленої для обробки тонкостінних деталей	На ринку існує явно виражений лідер та деяка кількість незначних конкурентів	Технологія доступна, але через непопулярність задачі є досить дорогою

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

4.3.1. Аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 14.)

Табл. 14. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продажів, ум.од.	20000-50000
3	Динаміка ринку, стан	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необов'язкові
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	18-20

4.3.2. Потенційні групи клієнтів (табл. 15.)

Табл. 15. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживача до товару
1	Неможливість забезпечення заданих характеристик точності на сучасних верстатах з ЧПК	Сучасні металообробні компанії. (авіа-, космічні- та приладобудівні галузі)	В силу однотипності проблеми відмінності майже непомітні.	Можливість забезпечення заданої точності за допомогою пропонованої оснастки
2	Неможливість забезпечення заданих характеристик точності на верстатах	Металообробні компанії. (агро- та ремонтні сегменти)	Відмінність в даному сегменті заключається в масовості виробів. Для ремонтних підприємств характерна мала серійність виробів	Можливість забезпечення заданої точності за допомогою пропонованої оснастки
3	Невелика кількість компаній які готові взятись за точну обробку кілець	Компанії, які розвиваються і беруться за замовлення «зі торони»	В силу однотипності проблеми відмінності майже непомітні.	Швидко впровадження і, відносно невелика ціна.

4.3.3. Аналіз ринкового середовища на наявність загроз та можливості (Табл. 16-17.)

Табл. 16. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Недостатня обізнаність виробників про методи вирішення проблеми	Виробник бачить проблему, але бореться з нею своїми силами, або альтернативними методами втрачаючи продуктивність	Співпраця з різними більш відомими компаніями на предмет перепродажів.
2	Сильні непрямі конкуренти, які можуть знищити репутацію	Конкуренти, які співпрацюють з потенційними клієнтами по різним питанням здатні знищити репутацію компанії ще до початку співпраці	Знайти сильну підтримку в вигляді одного важливого клієнту, який здатний поручитись за продукцію і компанію в цілому
3	Конкуренція	У світовому ринку уже давно існує лідер, який зайняв нішу	На території України його вплив не є таким сильним, тому здорова конкуренція + підтримка здатні нав'язати боротьбу

Табл. 17. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Відносно пустий ринок України	Вирішенням даної проблеми серйозно ніхто не займається, тому можливість захопити український ринок є	Активна і здорова рекламна та контактна компанія, в результаті якої великі компанії зроблять нам ім'я.
2	Недообізнаність населення	При правильній подачі інформації населення буде бачити в запропонованому методі панацею, щодо вирішення даного питання	Рекламна та контактна компанія задня завоювання нових ніш ринку
3	Просто впровадження	Запропонований метод вирішення здатен бути впровадженим моментально, що дозволить закривати питання клієнта за короткий час	Постійна готовність допомогти клієнту у вирішенні його запитань

4.3.3. Аналіз пропозиції (Табл. 18.)

Табл. 18. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Тип конкуренції – чиста	Мала кількість стихійних представників на ринку	Вільна діяльність
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний	На національному рівні конкурентів немає, а локальні конкуренти незначні	Почати діяльність потрібно з промислового регіону без конкуренції.
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Пропонований метод застосовується в дуже вузькому спектрі питань	Може викликати деякі проблеми на початку діяльності
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Вузький профіль вирішуваних питань	Необхідний повний аналіз ринку для розуміння правильних пріоритетів
5. За характером конкурентних переваг - цінова та нецінова	Метод є конкурентним в кожному з сегментів	Універсальність в характері дозволяє заходити на ринок з повністю конкурентним товаром
6. За інтенсивністю – не марочна	Інтенсивність товару є незначною оскільки проблема є вузькою	Необхідні певні вкладення, які перший час будуть нерентабельні

4.3.5. Аналіз умов конкурентності в галузі

Таблиця 19. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	-ЦТП	-Абпланалп Україна -імперія металів -Варіус -Сіко	-Шунк -Аналоги з азії	-Приладо-будівна -Літако -Космічна -Агро промисловості	-Електро-магнітні патрони _техноло-гічне армування і тп.
Висновки:	Слабка пряма конкуренція ринку	Наявна велика кількість потенційних конкурентів	Для розробленого методу	Вибір клієнтів є доволі значним. Але не кожна компанія потребує даного оснащення	Товари замінники є неконкурентними для середньо та серійного виробництва

4.3.6. Фактори конкурентоспроможності (Табл. 20.)

Табл. 20. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Низька ціна	В порівнянні з більш професійними рішеннями питання ціна кінцевого варіанту рішення значно нижче конкурентів
2	Швидкість впровадження	За рахунок швидкості впровадження виробу в роботу можна стверджувати, що продуктивність виростає
3	Універсальність	В порівнянні з конкурентами готове рішення є більш універсальним
4	Простота	Немає необхідності в спеціалістах для запуску методу в роботу
5	Висока якість	Дозволяє отримувати результати достатньо високої якості

4.3.7. Порівняльний аналіз факторів конкурентоспроможності (Табл. 21.)

Табл. 21. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін запропонованого методу

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали	Рейтинг товарів конкурентів
---	-------------------------------	------	-----------------------------

п/п		1-20	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Низька ціна	15	-	-	-	-	-	-	+
2	Швидкість впровадження	15	-	-	-	-	-	-	+
3	Універсальність	15	-	-	-	+	-	-	-
4	Простота	20	-	-	-	-	+	-	-
5	Висока якість	15	-	-	-	-	+	-	-

4.3.8. SWOT-аналіз (Табл. 22.)

Табл. 22. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: <ul style="list-style-type: none"> - Низька конкурентна вартість - Універсальність - Простота - Швидкість впровадження - Висока якість 	Слабкі сторони: <ul style="list-style-type: none"> - Навантажений непрямими конкурентами ринок - Слабка обізнаність потенційних клієнтів - Сильні світові конкуренти
Можливості: <ul style="list-style-type: none"> - Захоплення ринку - Налагодження відносин із великою кількістю клієнтів - Модернізація пропонованої продукції з урахуванням побажань клієнтів 	Загрози: <ul style="list-style-type: none"> - При виникненні попиту можуть з'явитись більш сильні конкуренти - Необхідність вносити зміни в процес можуть зупинити інтерес - Ринок є досить нестабільним

4.3.9. Альтернативні ринкові поведінки (Табл. 23.)

Табл. 23. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Налагодити співвідносини із сильним потенційним конкурентом і стати партнерами. Це дозволить використовуючи ім'я та репутацію відомого представника просувати свій продукт.	Ймовірність отримання ресурсів збільшується, але значно падає прибуток оскільки з'являється відсоток материнської компанії	Сроки реалізації від двох тижнів до місяця

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

4.4.1. Визначення стратегії охоплення ринку

Табл. 24. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
-------	--	---	---	--------------------------------------	--------------------------

1	-Авіабудування	Споживач готовий до сприйняття	1-2 одиниці на підприємство	Низька	Відносно проста
2	-Космічна промисловість	Споживач готовий до сприйняття	1-2 одиниці на підприємство	Низька	Відносно проста
3	-Агропромисловість	Споживач готовий до сприйняття	1 одиниця на підприємство	Середня	Середня
4	-Приладобудування	Споживач готовий до сприйняття	1 одиниця на підприємство	Низька	Складна
Які цільові групи обрано: Обрано всі перераховані цільові групи. Остання в пріоритетах: приладобудівна через складність заходу на ринок.					

4.4.2. Базова стратегія розвитку (Табл. 25.)

Табл. 25. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Стратегія лідерства по витратах	Унікальна цінова політика	Унікальна розробка дозволяє ставити ціну нижче ринкової	Стратегія спеціалізації
2	Стратегія диференціації	Унікальний продукт	Унікальність розробки дозволяє ставити свої унікальні умови на ринку	Стратегія спеціалізації

4.4.3. Базова стратегія поведінки (Табл. 26.)

Табл. 26. Визначення базової стратегії поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Проект не першопроходець	Суміщена стратегія завоювання ринку	Копіювання не буде. Взята за основу ідея і розробка унікального контенту	Стратегія заняття конкурентної ніші
2	Проект не першопроходець	Суміщена стратегія завоювання ринку	Копіювання не буде. Взята за основу ідея і розробка унікального контенту	Стратегія виклику лідеру

4.4.3. Базова стратегія позиціонування (Табл. 27.)

Табл. 27. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Вирішення поставленого питання найкращим способом	Стратегія спеціалізації	-Ціна -Спеціалізація -Простота -Універсальність	Якісно, швидко та просто
2	Вирішення поставленого питання найоптимальнішим способом	Стратегія лідерства по витратах	-Ціна -Спеціалізація -Простота -Універсальність	Дешево, якісно та просто

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

4.5.1. Маркетингова концепція товару (Табл. 28.)

Табл. 28. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1.	Оброблення тонкостінного кільця	Товар дозволяє обробити поверхні не створюючи додаткових незручностей	В порівнянні з деякими конкурентами не заважає всім етапам оброблення
2.	Досягнення необхідних критеріїв точності	Товар орієнтований на якісну обробку поверхонь і дозволяє досягати заданих ТЗ точностей	Дозволяє досягати такого ж результату з меншими затратами на реалізацію
3	Універсальність обладнання	Товар є досить універсальним і може підходити під різні цілі клієнта	Не має обмежень по використанню, як інші конкуренти

4.5.2. Трирівнева маркетингова модель товару (Табл. 29.)

Табл. 29. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Товар задовольняє потребу користувача у якісному та зручному обробленні деталей типу «тонкі кільця» із умовою досягнення необхідних критеріїв точності.
II. Товар у	Властивості та характеристики

реальному виконанні	1. Товар є методом із практичним використанням
	2. Дозволяє розрахувати залежність деформацій від режимів різання та сили затиску
	3. Має універсальне використання та рекомендації
III. Товар із підкріпленням	До продажу
	Після продажу
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Пропоную запатентувати метод «оброблення тонкостінних кілець на верстатах з ЧПК»	

4.5.3. Визначення цінових меж (Табл. 30.)

Табл. 30. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлені на товар
1.	2000-4000 Євро	600-3000 Євро	1000-100000 Євро	750-2500 Євро
2.	10-100 Євро	10-100 Євро	200-1000 Євро	10-25 Євро

4.5.4. Визначення оптимальної системи збуту (Табл. 31.)

Табл. 31. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Закупівлі по квартално	Моніторинг та постійний зв'язок з потенційними клієнтами	Глибоко	Власноруч
2.	Потреба – «терміново»	Можливість тримати ходові позиції на складі	Мілко	Власноруч
3.	Можлива розстрочка	Необхідний певний капітал та заготовка типового договору	Мілко	Власноруч
4.	Впровадження у виробництво	Технічна освіта	Глибоко	Власноруч

4.5.5 Розроблення концепції маркетингових комунікацій (Табл.

32.)

Табл. 32. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Інтерес до акційних пропозицій	Електронна пошта, та інші інтернет комунікації. Телефон	Токарна обробка. Тонкі кільця. Точність оброблення.	Донести інформацію до споживача	Коротка інформація та контакти для зв'язку
2.	Інтерес до нової продукції	Електронна пошта, та інші інтернет комунікації. Телефон	Токарна обробка. Тонкі кільця. Точність оброблення.	Донести інформацію до споживача	Коротка інформація та контакти для зв'язку
3.	Загальний інтерес	Інтернет середовища	Токарна обробка. Тонкі кільця. Точність оброблення.	Донести інформацію до споживача	Коротка інформація та контакти для зв'язку
4.	Терміновий пошук рішення	Електронна пошта, та інші інтернет комунікації. Телефон	Токарна обробка. Тонкі кільця. Точність оброблення.	Донести інформацію до споживача	Коротка інформація та контакти для зв'язку

4.6. Висновки

Розроблення стартап проекту показує, що продукт має гарні шанси для виходу на ринок та закріплення на лідируючих позиціях. Прогнозується достатній попит на запропонований товар. Найважливішим пунктом для вдалого запуску проекту є досення інформації для потенційних споживачів продукту. Через незаповненість ринку можна стверджувати, що товар є вдалообраним та може мати гарну позицію на ринку. Подальша імплементація проекту є доцільною для вдалого розвитку.

Технологія була впроваджена на ряд підприємств, акти про впровадження в Додатку А.

5. ВИСНОВКИ

У дисертації приведені результати теоретичних та практичних досліджень процесу токарної обробки у системі токарний патрон-деталь, присутніх у даній системі збурюючих, деформуючих та ін. сил, що дозволило використовувати отримані дані для аналізу та вдосконалення існуючого методу обробки деталей типу «тонкі кільця», створення рекомендацій по вибору токарної оснастки, яка покращить процес, та вибір режимів різання. Керуючись даними рекомендаціями можна досягнути збільшення продуктивності без втрат в якості оброблених поверхонь та деталі в цілому.

Було проаналізовано сучасний стан проблеми, літературні джерела, наукові та виробничі методи, надана математична модель, що дозволяє розрахувати необхідні значення, промодельовано в САМ та САЕ системах на практиці було проведено ряд експериментів та зроблено практичні висновки по даній темі.

В ході проведеного експерименту було підтверджено, що деформації деталі напряму залежать від сил затиску та режимів різання, а товщина стінки отриманої деталі в залежності від положення кулачків патрону може змінювати своє значення в діапазоні до 0,6мм (згідно проведених дослідів).

Окрім цього при розрахунку відхилень зовнішніх діаметрів оброблених кілець було зроблено висновки про те, що відхилення по зовнішньому діаметру не перевищують $\delta_{D_{\max 9}} = 0,06\text{мм}$, $\delta_{D_{\min 9}} = 0,06\text{мм}$, а для внутрішнього відповідно $\delta_{d_{\max 3}} = 0,09\text{мм}$, $\delta_{d_{\min 9}} = 0,10\text{мм}$.

Отже отриманні результати дозволяють сверджувати, що запропоновані в роботі рекомендації мають право на існування і можуть бути використані на практиці в різних металообробних галузях і на різних підприємствах і різни парком обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Куклев Л. С., Тазетдинов М. М. К89 Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности. — М.: Машиностроение, 1978. — 104 с. с ил.
2. Билик Ш. М. Микрогеометрия деталей машин. М., «Машиностроение», 1973. 344 с.
3. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М., «Машиностроение», 1975. 224 с.
4. Подпоркин В. Г. Обработка нежестких деталей. М., Машгиз, 1959. 208 с
5. Проблемы развития технологии машиностроения. Под ред. Э. А. Сатя. М., «Машиностроение», 1968. 592 с. Авт.: Э. А. Сатель, В. В. Фролов, Д. А. Прокошкин и др.
6. Самоподнастраивающиеся станки. Под ред. Б. С. Балашкина. М., «Машиностроение», 1967. 400 с. Авт.: Б. С. Балашкин, Н. Н. Рясик, С. П. Протопопов и др.
7. Силин С. С. Автоматическое управление процессом резания. — «Станки и инструмент», 1971, с. 13— 14.
8. Прогрессивные конструкции станочных приспособлений. Под ред. В. А. Блюмберга. Л., «Машиностроение», 1969. 271 с. Авт.: Б. И. Френкель, П. А. Пакидов, К. С. Байкачев и др.
9. Токарные станки. М., «Машиностроение», 1973. 280 с. Авт.: А. А. Модзелевский, А. А. Мушинкин, С. С. Кедров и др.
10. Заплетохин В. А. Соединение деталей прибора. Ленинградский университет, 1974. 187 с.
11. Кейга Ч. Клеевые соединения. М., «Мир», 1971. 295 с.

12. Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д. Автоматизация выбора рациональных режимов токарной обработки тонкостенных деталей. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-02-1587>

13. Campbell F.C. Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials. Elsevier Ltd, 2006, 603p.

14. Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С., Лазаренко Г.П., Семисалов В.И. О «мягких» режимах резания для обработки тонкостенных деталей // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №6 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/117TVN616.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ

15. Арбузов Е.В., Жаргалова А.Д., Лазаренко Г.П., Семисалов В.И. / К вопросу о деформации тонкостенных деталей при обработке на станках токарной группы // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. №4. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/353914.html> (дата обращения 14.04.2016).

16. Справочник технолога-машиностроителя / В 2-х т. Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. 5-е изд. Перераб. и доп. - М.: Машиностроение-1, 2001. - 918 с.

17. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. - М.: Высшая школа, 1985. - 304 с.

18. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. - М.: Машиностроение, 1967. - 500 с

19. Дальский А.М., Суслов А.Г., Жесткова И.Н. и др. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.

20. Гузеев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В. Режимы резания для токарных и сверлильнофрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: Справочник. М.: Машиностроение, 2007. 366 с.
21. [4] A. H. Slocum. Precision Machine Design, Prentice-Hall, Society of Manufacturing Engineers Dearborn (MI), USA, 1992.
22. M. Rahman, M. Tsutsumi, J. Mater. Process. Technol. 38 (1993) 407-415.
23. P.F. Feng, D.W. Yu, Z.J. Wu, E.Uhlmann, Int. J. Mach. Tools Manuf. 48 (2008) 1268-1275.
24. P.F. Feng, Z.J. Wu, D.W. Yu, E. Uhlmann, J. Mater. Process. Technol. 204 (2008) 124-129.
25. M. Rahman, Y. Ito, J. Sound Vib. 102 (1985) 515-525.
26. Contact mechanics applied to the machining of thin rings / Estrems M., Carrero-Blanco J., Cumbicus W. E., de Francisco O., Sánchez H. T. // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 13. P. 655–662. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.138>
27. U. Heisel, C. Kang. Prod. Eng. 5 (2011) 151-158.
28. J. Malluck, S. N. Melkote, J. Manuf. Sci. Eng. 126 (2004) 141-147.
29. M. S. Kurnadi, J. Morehouse, S. N. Melkote, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 32 (2007) 656–665.
30. J. Sölter, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 40 (5 6) (2009), 380-384.
31. L. Nowag, J. Sölter, E. Brinksmeier, Prod. Eng. 1 (2007) 135-139.
32. J. Sölter, C. Grote, E. Brinksmeier, Mach. Sci. Technol. 15 (2011) 338-355.

33. D. Stöbener, B. Beekhuis CIRP Ann. – Manuf. Technol. 62 (2013) 511-514.
34. M. Estrems, M. Arizmendi, A. J. Zabaleta, A. Gil, Numerical Method to Calculate the Deformation of Thin Rings during Turning Operation and its Influence on the Roundness Tolerance. Proceedings of 6th Manufacturing Society International Conference (MESIC 2015). Barcelona, Spain, 2015.
35. J. Carrero-Blanco, M. Estrems, H.T. Sánchez, Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing. 32 (2016) 240–251.
36. M. Estrems, F. Faura, J.I. Pedrero, Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing. 16 (2000) 455-470.
37. C. Cattaneo, Rendiconti dell'Accademia Nazionale dei Lincei. 27 (6) (1938) 342-348.
38. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. - М.: Гос. изд. физ-мат. лит., 1963.— 636 с.
39. А.П. Моргунов, П.Н. Ластовский Обеспечение заданных требований точности размерной обработки тонкостенных деталей летательных аппаратов — Машиностроение и машиноведенье. — Омск: Омский научный вестник, 2003. — 63с.
40. Флюггс В. Статика и динамика оболочек. – М.; гос. изд. 1961. — 307 с.
41. Расчет режимов резания. Учебное пособие / Безъязычный В. Ф., Аверьянов И. Н., Кордюков А. В. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с.
42. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 277с;

Додаток А

